

การศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูง
จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและค่าจากการทดลอง
A Comparative Study of High Explosive Power by a Simple
Thermochemistry Calculation and Experimental Values

พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืองศักดิ์ อยู่ชา^{1*}
Colonel Assistant Professor Ruangsak Yucha^{1*}
พันตรี ดร. ฐิติพงษ์ กาวิชัย²
Major Dr. Thitipong Kawichai²

¹กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
นครนายก 26001 ประเทศไทย

¹Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy,
NakhonNayok 26001, Thailand

²กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ ส่วนการศึกษา
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก 26001 ประเทศไทย

²Department of Mathematics and Computer Science, Academic Division,
Chulachomklao royal military academy, Nakhon Nayok 26001, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : ruangsak.yu@crma.ac.th

(Received: August 8, 2023, Revised: October 2, 2023, Accepted: October 20, 2023)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีการใช้งานทางทหารและทางพลเรือนจำนวน 18 ชนิด จากการคำนวณโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายเปรียบเทียบกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test พบว่าค่ากำลังของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิด ที่คำนวณโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่หาโดยวิธี Trauzl Lead Block Test นอกจากนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่หาได้ทั้งจากการคำนวณโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test พบว่าวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเข้าใกล้ศูนย์จะเป็นวัตถุระเบิดที่มีค่ากำลังของวัตถุระเบิดมากกว่าวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเป็นค่าบวกหรือค่าติดลบมาก ๆ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้อธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) ที่นิยมใช้อัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท 94% ต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 6% ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : เทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิด สมมูลออกซิเจน กำลังวัตถุระเบิด

Abstract : This research aims to study the power of 18 types of high explosives in military and civilian uses. The comparison result showed that the values of explosive power calculated by the simple thermochemical principle and the ones determined from the experimental method by Trauzl Lead Block Test were close. In addition, the study of relationship between the oxygen balance and the values of explosive power, either from simple thermochemical calculation or from experimental method by Trauzl Lead Block Test, revealed that the explosives with near-zero oxygen balance have much higher power than the ones with positive or negative oxygen balance. This result can be a good explanation for the design of Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) mixed explosives, which often have a mixture ratio of 94% ammonium nitrate to 6% fuel oil.

Keyword : Thermochemistry of Explosive, Oxygen Balance, Power of Explosive

1. บทนำ

ปัจจุบันการศึกษาทางด้านเทอร์โมเคมี (Thermochemistry) ของวัตถุระเบิดยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทยมากนัก อย่างไรก็ตามการศึกษาทางด้านเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดมีประโยชน์อย่างมากในการนำวัตถุระเบิดไปใช้งานให้เหมาะสมกับชนิดของงาน [1], [2], [3] เนื่องจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีทำให้ทราบคุณสมบัติของวัตถุระเบิดเบื้องต้น ได้แก่ ความร้อนจากการระเบิด (Heat of Explosion, Q) ปริมาตรของแก๊สจากการระเบิด (Volume of Gaseous Product from Explosion, V) และ กำลังของวัตถุระเบิด (Explosive Power, EP) ซึ่งค่าที่คำนวณได้จากหลักการทางเทอร์โมเคมีที่สำคัญคือค่ากำลังของวัตถุระเบิด เนื่องจากสามารถนำไปประมาณการหาอำนาจการฉีกขาดของวัตถุระเบิดได้หากทราบค่าอัตราเร็วในการสลายตัวของวัตถุระเบิด โดยทั่วไปค่ากำลังของวัตถุระเบิดสามารถทำการทดลองหาได้โดยใช้วิธีการตรวจสอบที่เรียกว่า Trauzl Lead Block Test และ Ballistic Mortar Test [4], [5] อย่างไรก็ตามวิธี Trauzl Lead Block Test เป็นวิธีพื้นฐานสำหรับการหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดและเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง [5] รวมทั้งได้มีการรวบรวมผลการทดสอบไว้ในเอกสาร [6], [7]

การทดสอบวัตถุระเบิดนั้นไม่สามารถใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดอ่อนได้ ทำให้ไม่สามารถทราบผลการทดลองที่แน่นอนได้ นอกจากนี้การทดสอบคุณสมบัติของวัตถุระเบิดในทางปฏิบัติไม่ว่าจะทำการทดลองหรือทดสอบด้วยวิธีการใดก็ตามจะนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับวัตถุระเบิดมาตรฐาน โดยวัตถุระเบิดไตรโนโตรโทลูอีน (Trinitrotoluene, TNT) ถูกกำหนดให้เป็นวัตถุระเบิดมาตรฐานของกองทัพบกสหรัฐอเมริกา ค่าที่วัดได้จากสมบัติของวัตถุระเบิดมักรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับวัตถุระเบิดไตรโนโตรโทลูอีน นอกจากนี้การทดลองที่เกี่ยวข้องกับวัตถุระเบิดจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำการทดลอง ดังนั้นการประมาณการค่าสมบัติทางวัตถุระเบิด

เบื้องต้นโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการประมาณค่าคุณสมบัติของวัตถุระเบิดเบื้องต้น จากการศึกษาทางด้านเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดที่ผ่านมาวิธีวิธีการประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดหลายวิธี [6], [8], [9], [10], [11] ตัวอย่างงานวิจัยของ M.H. Keshavarz และ F. Seif [9] ได้ทำการหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดเปรียบเทียบกับกำลังของวัตถุระเบิดไตรโนโตรโทลูอีน (EP (%TNT)) สำหรับโมเลกุลของวัตถุระเบิดที่มีสูตรเป็น $C_aH_bN_cO_d$ โดยใช้สมการที่ 1

$$EP(\%TNT) = 113 - 5.16 \times CEC - 46.18 \times OCF \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } CEC = a - 0.54 \times c - 0.70 \times d$$

$$\text{และ } OCF = 0.7 \text{ เมื่อ } d - \left(a + \frac{b}{2}\right) \geq 8$$

โดย a, b, c และ d หมายถึงจำนวนอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนในสูตรโมเลกุลของวัตถุระเบิดตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูง 18 ชนิด โดยใช้เทอร์โมเคมีอย่างง่ายซึ่งเป็นวิธีที่สามารถคำนวณหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดได้โดยง่ายและเปรียบเทียบกับกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จาก 2 วิธีดังกล่าว นอกจากนี้ยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมดุลออกซิเจน (Oxygen Balance, OB) ของวัตถุระเบิดกับกำลังของวัตถุระเบิดที่หาจากทั้งสองวิธี หลังจากนั้นจะนำวิธีการประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้เทอร์โมเคมีอย่างง่ายอธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดที่นิยมใช้ในงานพลเรือนด้านเหมือง งานก่อสร้าง รวมทั้งนิยมนำไปใช้เป็นวัตถุระเบิดแสงเครื่องอีกด้วย ซึ่งอัตราส่วนผสมของวัตถุระเบิดชนิด ANFO ที่

นิยมใช้มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท 94% ต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 6% โดยน้ำหนัก [12], [13] ตามลำดับ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิด (Thermochemistry of Explosive) เป็นเรื่องสำคัญสำหรับการศึกษาทางด้านเคมีวัตถุระเบิด โดยเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน กลไกและจลนศาสตร์ที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุระเบิดเกิดการระเบิดหรือเกิดการสลายตัว [2], [14]

ปฏิกิริยาการระเบิดของวัตถุระเบิดเริ่มขึ้นเมื่อโมเลกุลของวัตถุระเบิดได้รับการกระตุ้นจนแตกออกเป็นอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลวัตถุระเบิด หลังจากนั้นอะตอมของธาตุที่แตกตัวออกจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีความเสถียร โดยทั่วไปโมเลกุลวัตถุระเบิดที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน (C) อะตอมออกซิเจน (O) อะตอมไฮโดรเจน (H) และอะตอมไนโตรเจน (N) เมื่อสลายตัวจะเปลี่ยนเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ น้ำ (H_2O) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สออกซิเจน (O_2) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นโมเลกุลชนิดใดขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่มีในขณะที่จะอะตอมของธาตุที่แตกตัวออกมาจากโมเลกุลวัตถุระเบิดรวมตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิด สำหรับค่าตัวแปรที่สำคัญทางเทอร์โมเคมี ได้แก่ สมดุลออกซิเจน ความร้อนจากการระเบิด ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด และกำลังของวัตถุระเบิด [2], [14]

2.1 สมดุลออกซิเจน (Oxygen Balance)

สมดุลออกซิเจน (Oxygen Balance, OB) เป็นอัตราส่วนของปริมาณออกซิเจน (O) ที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุระเบิด กับปริมาณออกซิเจน (O) ที่ต้องการใช้เพื่อให้เชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ โดยค่า OB จะแสดงปริมาณออกซิเจนที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อวัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันสมบูรณ์ หรือปริมาณออกซิเจนที่วัตถุระเบิดต้องการเพื่อให้วัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันสมบูรณ์โดยคิดเทียบกับวัตถุระเบิดน้ำหนัก 100 กรัม

ดังนั้น ค่า OB จึงมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ค่า OB ของวัตถุระเบิดแสดงให้เห็นทราบว่า เมื่อวัตถุระเบิดชนิดนั้นเกิดการระเบิด ปริมาณออกซิเจน (O) ที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุระเบิดมีเพียงพอที่จะเข้าร่วมตัวกับธาตุอื่น ๆ ออกมาเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ (H_2O) หรือไม่ โดยถ้าค่า OB เป็นลบ แสดงว่าวัตถุระเบิดชนิดนั้นมีออกซิเจนในโมเลกุลไม่เพียงพอที่จะให้เชื้อเพลิงที่อยู่ในโมเลกุลของวัตถุระเบิดเกิดออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ โดยวัตถุระเบิดที่มีสูตรโมเลกุลทั่วไปเป็น $C_aH_bN_cO_d$ จะสามารถหาค่า OB ของวัตถุระเบิดโดยใช้สมการที่ 2

$$OB = \frac{\left(d - 2a - \frac{b}{2}\right) \times 1600}{M} \quad (2)$$

เมื่อ a, b, c และ d หมายถึงจำนวนอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนในสูตรโมเลกุลตามลำดับ และ M คือมวลโมเลกุลของวัตถุระเบิด [2], [3], [5], [14], [15], [16]

2.2 การสลายตัวของวัตถุระเบิด (Explosive Decomposition)

ในทางเทอร์โมเคมีของวัตถุระเบิดได้มีการพัฒนากฎเพื่อใช้ในการกำหนดปฏิกิริยาการสลายตัวของวัตถุระเบิดที่มีสูตรทั่วไปเป็น $C_aH_bN_cO_d$ โดยกฎดังกล่าวได้รับการพัฒนาโดย Kistiakowsky และ Wilson ซึ่งเรียกว่า K-W rules สำหรับวัตถุระเบิดที่มีค่า OB มากกว่า -40% และ Modified K-W rules สำหรับวัตถุระเบิดที่มีค่า OB น้อยกว่า -40% เงื่อนไขสำหรับการทำนายผลิตภัณฑ์จากการระเบิดตาม K-W rules และ Modified K-W rules แสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ การทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิดมีความสำคัญในการนำข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดไปใช้ในการคำนวณความร้อนจากการระเบิด

ตารางที่ 1 เงื่อนไขแสดงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจาก
การระเบิดตาม K-W rules [2], [14]

ขั้นที่	เงื่อนไขตาม K-W rules
1	อะตอมคาร์บอน (C) เปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
2	ถ้ามีอะตอมออกซิเจน (O) เหลือ อะตอมออกซิเจน (O) จะรวมกับอะตอมไฮโดรเจน (H) ได้เป็นโมเลกุลของไอน้ำ (H ₂ O)
3	ถ้ายังมีอะตอมออกซิเจน (O) เหลือ โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) จะรวมตัวกับอะตอมออกซิเจน (O) ที่เหลือ ได้เป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)
4	อะตอมไนโตรเจน (N) ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (N ₂)

2.3 ความร้อนจากการระเบิด (Heat of Explosion)

เมื่อวัตถุระเบิดเกิดการระเบิดหรือสลายตัว พลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของความร้อน การปลดปล่อยความร้อนภายใต้สภาวะซึ่งไม่มีการได้หรือสูญเสียความร้อน (Adiabatic Conditions) เรียกว่า ความร้อนของการระเบิด ปฏิริยาการระเบิดของวัตถุระเบิดเริ่มขึ้นเมื่อโมเลกุลของวัตถุระเบิดได้รับพลังงานกระตุ้น หลังจากนั้นโมเลกุลของวัตถุระเบิดจะแตกออกเป็นอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลวัตถุระเบิด หลังจากนั้นอะตอมของธาตุที่แตกตัวออกมาจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีความเสถียร ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการคายพลังงานความร้อนออกมาตามหลักการของการเกิดสารประกอบทางเคมีจากอะตอมของธาตุ โดยผลต่างของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของอะตอมของธาตุแล้วเกิดเป็นสารประกอบกับพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำโมเลกุลของวัตถุระเบิดแตกออกเป็นอะตอมของธาตุคือความร้อนของการระเบิดนั่นเอง

ตารางที่ 2 เงื่อนไขแสดงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจาก
การระเบิดตาม Modified K-W rules [2], [14]

ขั้นที่	เงื่อนไขตาม Modified K-W rules
1	อะตอมไฮโดรเจน (H) เปลี่ยนเป็นโมเลกุลของไอน้ำ (H ₂ O)
2	ถ้ามีอะตอมออกซิเจน (O) เหลืออยู่ อะตอมคาร์บอน (C) เปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
3	ถ้ายังมีอะตอมออกซิเจน (O) เหลืออยู่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) รวมตัวกับอะตอมออกซิเจน (O) ได้เป็นโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)
4	อะตอมไนโตรเจน (N) ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (N ₂)

ในการคำนวณความร้อนของการระเบิดของวัตถุระเบิด เริ่มจากการทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายตัวของวัตถุระเบิด หลังจากนั้นคำนวณค่าความร้อนจากการระเบิดโดยใช้ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (Standard Enthalpies of Formation, ΔH_f^0) โดยค่า ΔH_f^0 หมายถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากการที่ทำให้ธาตุองค์ประกอบทำปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นสารประกอบหนึ่งจำนวน 1 โมล ที่อุณหภูมิ 25 °C ความดัน 1 atm โดยที่เครื่องหมายบวกหมายถึงพลังงานความร้อนผ่านเข้าไปในระบบ และเครื่องหมายลบหมายถึงพลังงานความร้อนออกจากระบบ ค่าความร้อนจากการระเบิดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3

$$Q = \sum \Delta H_f^0 (\text{Products}) - \sum \Delta H_f^0 (\text{Reactants}) \quad (3)$$

เมื่อแทนค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดและเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของวัตถุระเบิดจากเอกสารอ้างอิง [7]

ลงในสมการ 3 จะได้ค่าความร้อนของการระเบิด (Q) โดยทั่วไปค่าความร้อนจากการระเบิดจะมีหน่วยเป็น kJ/kg เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากการระเบิดของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด [2], [9], [11], [14]

สำหรับค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิด ได้แก่ CO, CO₂ และ H₂O แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด CO, CO₂ และ H₂O [7]

สาร	เอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (ΔH_f^0 , kJ/mol)
CO	- 110.6
CO ₂	- 393.8
H ₂ O (g)	- 242.0

สำหรับธาตุที่มีอยู่ในสภาพธรรมชาติที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดเป็นศูนย์ ($\Delta H_f^0 = 0$) ได้แก่ C (s), O₂ (g), N₂ (g)

2.4 ปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุระเบิด (Volume of Gaseous Product from Explosion)

การระเบิดของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด จะให้ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดไม่เท่ากัน ในการคำนวณปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) นั้น สามารถคำนวณได้จากผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุระเบิด (Decomposition Product) ภายใต้ข้อกำหนดที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure, STP) อุณหภูมิ 0 °C หรือ 273 K และความดัน 1 บรรยากาศ ปริมาตรของแก๊สใด ๆ จำนวน 1 โมล มีค่าเท่ากับ 22.4 ลิตร เรียกว่า Molar Gas Volume [2], [14]

การคำนวณปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิดแต่ละชนิดที่สภาวะมาตรฐานจะเทียบต่อมวลของวัตถุระเบิดชนิดนั้นปริมาณ 1 กรัม ดังนั้น ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดมีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อกรัม (dm³/g)

2.5 กำลังของวัตถุระเบิด (Explosive Power)

การคำนวณกำลังของวัตถุระเบิด (EP) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (4) [2]

$$EP = Q \times V \quad (4)$$

โดยที่ Q คือ ความร้อนของการระเบิด (kJ/kg)

V คือ ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (dm³/g)

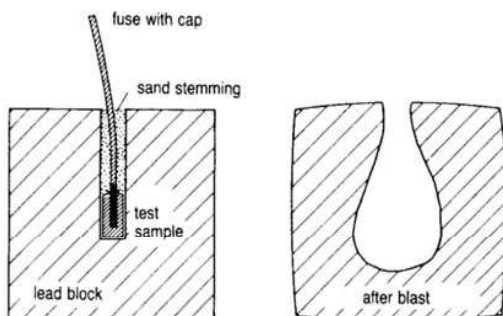
เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกำลังของวัตถุระเบิดชนิดต่าง ๆ ให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น กำลังของวัตถุระเบิดส่วนใหญ่จะแสดงอยู่ในรูปของการเปรียบเทียบกับกำลังของวัตถุระเบิดชนิดต่าง ๆ กับกำลังของวัตถุระเบิดมาตรฐาน สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดให้วัตถุระเบิดมาตรฐาน คือ ทีเอ็นที (TNT) ดังนั้นกำลังของวัตถุระเบิดชนิดต่าง ๆ จะแสดงในรูปของ %TNT ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (5) [10], [11]

$$EP (\%TNT) = \frac{Q_{\text{Explosive}} \times V_{\text{Explosive}}}{Q_{\text{TNT}} \times V_{\text{TNT}}} \times 100 \quad (5)$$

2.6 การหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง

กำลังของวัตถุระเบิด คือพลังงานทั้งหมดที่สามารถทำงานได้ กำลังของวัตถุระเบิดมีความสัมพันธ์กับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (Q) และแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) สำหรับวิธีการตรวจสอบเพื่อหาลำดับของวัตถุระเบิดสามารถทำได้โดยใช้วิธีการทดสอบด้วยลูกตุ้มชิปโนวี (Ballistic Mortar Test) วิธีนี้ทำโดยบรรจุวัตถุระเบิดที่ต้องการทดสอบกำลังลงในแท่งเหล็กทรงกระบอกที่แขวนอยู่ด้านล่างของคานแกว่ง และเมื่อทำการจุดระเบิด

วัตถุระเบิดที่ต้องการทดสอบ แรงระเบิดจะทำให้แท่งเหล็กทรงกระบอกแกว่งซึ่งสามารถวัดค่าการแกว่งเป็นองศาเปรียบเทียบกับการจุดระเบิดวัตถุระเบิดมาตรฐานที่อื่นที่ได้ สำหรับการทดสอบกำลังวัตถุระเบิดอีกวิธีหนึ่งเรียกว่า วิธีการทดสอบด้วยแท่งตะกั่ว (Trauzl Lead Block Test) ซึ่งเป็นการทดสอบการขยายตัวของแท่งตะกั่ว เมื่อทำให้วัตถุระเบิดในปริมาณที่กำหนดระเบิดในรูกระบอกแท่งตะกั่วบริสุทธิ์ (ภาพที่ 1) หลายประเทศจะรายงานผลค่า Trauzl Lead Block Test เทียบกับปริมาตรที่เกิดจากการขยายตัวจากการระเบิดของวัตถุระเบิด TNT (%TNT) และกำหนดให้ปริมาตรที่เกิดจากการขยายตัวจากการระเบิดของวัตถุระเบิด TNT มีค่าเท่ากับ 100% [4], [5]



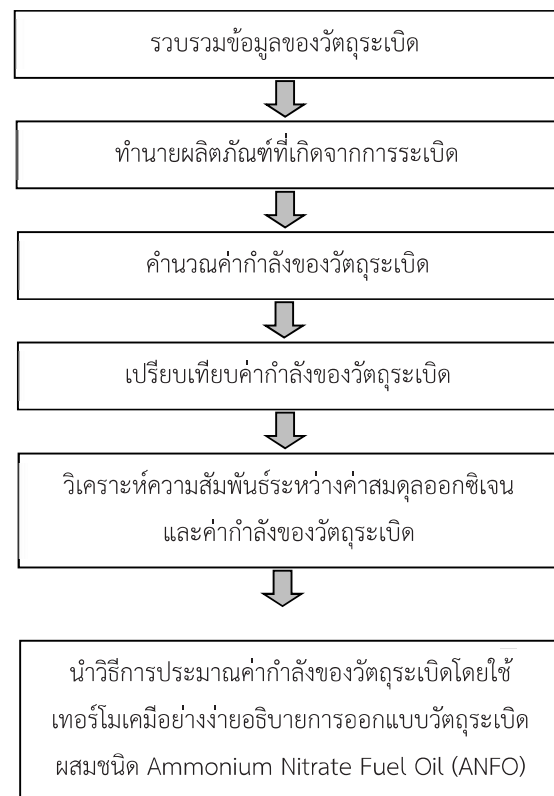
ก่อนการทดสอบ

หลังการทดสอบ

ภาพที่ 1 การหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้
Trauzl Lead Block Test [7]

3. วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิดจำนวน 18 ชนิด ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธีการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test โดยมีขั้นตอนดำเนินการวิจัยทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 การรวบรวมข้อมูลของวัตถุระเบิด

ข้อมูลพื้นฐานของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิด ได้แก่ สูตรโมเลกุล ค่ามวลโมเลกุล ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดของโมเลกุลวัตถุระเบิด (ΔH_f^0) และค่าสมดุลออกซิเจน (OB) รวมถึงค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test ถูกรวบรวมมาจาก [7]

3.2 การทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการระเบิด

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการระเบิดของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิด สามารถทำนายได้โดยใช้ K-W rules เมื่อวัตถุระเบิดมีค่าสมดุลออกซิเจนมากกว่า -40% และใช้ Modified K-W rules เมื่อวัตถุระเบิดมีค่าสมดุลออกซิเจนน้อยกว่า -40%

3.3 การคำนวณค่ากำลังของวัตถุระเบิด

จากการทำนายผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการระเบิดของวัตถุระเบิด ทำให้สามารถคำนวณความร้อนจากการระเบิด (Q) ได้ ตามสมการที่ 3 สำหรับปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการระเบิดของวัตถุระเบิด (V) สามารถคำนวณได้จากผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของวัตถุระเบิด จากนั้นกำลังของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิดจะสามารถคำนวณได้จากค่า Q และ V ตามสมการที่ 4

3.4 การเปรียบเทียบค่ากำลังของวัตถุระเบิด

ค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่คำนวณโดยใช้ข้อมูลทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อทดสอบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองหรือไม่ โดยใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

เมื่อ y_i คือ ค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test (%TNT)

$\hat{y}_i$ คือ ค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (%TNT)

$\bar{y}$ คือ ค่ากำลังของวัตถุระเบิดเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test

n คือ จำนวนของวัตถุระเบิดที่ใช้ในการศึกษา

3.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมดุลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิด

ในขั้นตอนนี้ค่าสมดุลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดทั้งที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและจากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมดุลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) ในรูปของสมการ $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ เมื่อ X คือค่าสมดุลออกซิเจน (%) Y คือค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) β_0 และ β_1 แทนค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย นอกจากนี้จะทำการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย ($H_0: \beta_1 = 0, H_1: \beta_1 \neq 0$) เพื่อทดสอบว่าค่าสมดุลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันหรือไม่ ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุระเบิดที่มีค่าสมดุลออกซิเจนเป็นบวกมีจำนวนเพียง 2 ชนิด ได้แก่ Ammonium Nitrate (AN) และ Nitroglycerine ซึ่งมีปริมาณไม่มากพอที่จะสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ทางสถิติได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายและการทดสอบสมมติฐานดังกล่าวจะพิจารณาเพียงข้อมูลของวัตถุระเบิดที่มีค่าสมดุลออกซิเจนเป็นลบหรือศูนย์เท่านั้น

4. ผลการศึกษา

4.1 ข้อมูลของวัตถุระเบิดที่ใช้ในการศึกษา

วัตถุระเบิดที่ใช้ในการศึกษานี้มีจำนวนทั้งสิ้น 18 ชนิด โดยมีข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ชื่อ สูตรโมเลกุล และการใช้ประโยชน์แสดงในตารางที่ 4 สำหรับค่ามวลโมเลกุล ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (ΔH_f^0) และค่าสมดุลออกซิเจน (OB) ที่รวบรวมได้จาก [7] แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 สูตรโมเลกุลและการใช้ประโยชน์ของ
โมเลกุลวัตถุระเบิดที่ทำการศึกษา

ชื่อ	สูตรโมเลกุล	การใช้ประโยชน์
Ammonium nitrate (AN)	NH_4NO_3	ใช้เป็นวัตถุระเบิดหลัก และเป็นส่วนผสมในการผลิตไดนาไมท์ และวัตถุระเบิดผสมทางพลเรือน
Cyclotetra-methylenetetra-nitramine (Octogen, HMX)	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	ใช้ผสมกับ TNT เป็นวัตถุระเบิดทางทหารใช้ในงานการทำลาย
Dinitrobenzene	$\text{C}_6\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_4$	-
Dinitrotoluene (DNT)	$\text{C}_7\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_4$	ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัตถุระเบิดทางพลเรือน
EthylNitrate	$\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_3$	ใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในจรวด
Hexanitrostibene (HNS)	$\text{C}_{14}\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_{12}$	ใช้ในจรวดอวกาศ
Methylnitrate	CH_3NO_3	ใช้เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงในจรวด
Nitroglycerine (NG)	$\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$	ใช้เป็นส่วนประกอบของดินสั่งกระสุนและใช้ทำไดนาไมท์
Nitroglycol	$\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_6$	ใช้ผลิตไดนาไมท์สำหรับใช้ในประเทศเขตอากาศหนาว

ชื่อ	สูตรโมเลกุล	การใช้ประโยชน์
Nitromethane	CH_3NO_2	ใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในจรวดอวกาศ
PETN	$\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$	ใช้ทำฝักกระเบิด ดินนําระเบิดและดินขยายการระเบิด
Picric acid	$\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$	ใช้สำหรับทำวัตถุระเบิดผสม
RDX	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของดินนําระเบิด เชื้อปะทุ และใช้ทำวัตถุระเบิดผสม
TATB	$\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	ใช้เป็นส่วนผสมในวัตถุระเบิดพลาสติก
Tetryl	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_8$	ใช้ทำดินขยายการระเบิด ใช้ทำวัตถุระเบิด ใช้ทำดินนําระเบิด และเชื้อปะทุ
TNT	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	ใช้บรรจุลูกกระสุนปืนใหญ่ ลูกระเบิดอากาศ ลูกระเบิดขว้าง ดินระเบิดทำลาย
Trinitroaniline	$\text{C}_6\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_6$	เป็นส่วนประกอบในหัวระเบิดขนาดเล็ก
Urea Nitrate	$\text{CH}_5\text{N}_3\text{O}_4$	ใช้เป็นส่วนผสมในวัตถุระเบิดแสงเครื่อง

ตารางที่ 5 คำนวณโมเลกุล เอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (ΔH_f^0) และค่าสมดุลออกซิเจน (OB) ของวัตถุระเบิดที่ทำการศึกษา [7]

ชื่อ	มวล โมเลกุล	ΔH_f^0 (kJ/mol)	OB (%)
AN	80	-365.36	+20.0
HMX	296.2	+75.03	-21.6
Dinitrobenzene	168.1	-27.20	-95.2
DNT	182.1	-43.92	-114.4
EthylNitrate	91	-190.28	-61.5
HNS	450.1	+78.23	-67.6
MethylNitrate	77	-155.82	-10.4
NG	227.1	-370.72	+3.5
Nitroglycol	152.1	-242.81	0.0
Nitromethane	61	-113.02	-39.3
PETN	316.1	-538.85	-10.1
Picric acid	229.1	-248.53	-45.4
RDX	222.1	+66.94	-21.6
TATB	258.1	-139.71	-55.8
Tetryl	287.1	+20.01	-47.4
TNT	227.1	-67.06	-74.0
Trinitroaniline	228.1	-83.96	-56.1
Urea Nitrate	123.1	-562.94	-6.5

4.2 ผลิตรกณ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิด

จากการใช้ K-W rules และ Modified K-W rules สามารถทำนายผลิตรกณ์ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของวัตถุระเบิดทั้ง 18 ชนิดได้ แสดงผลการทำนายดังต่อไปนี้

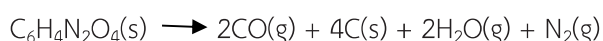
1. AN



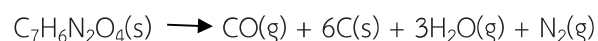
2. HMX



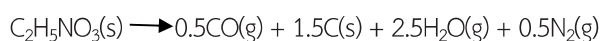
3. Dinitrobenzene



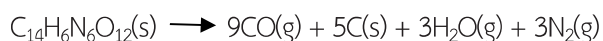
4. DNT



5. EthylNitrate



6. HNS



7. MethylNitrate



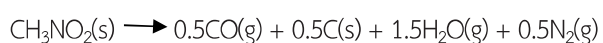
8. NG



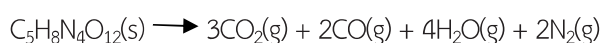
9. Nitroglycol



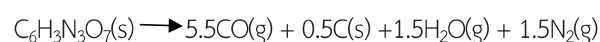
10. Nitromethane



11. PETN



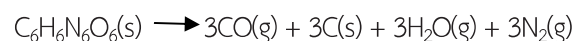
12. Picric acid



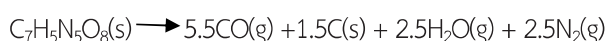
13. RDX



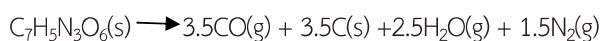
14. TATB



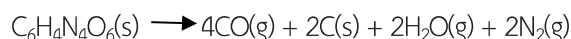
15. Tetryl



16. TNT



17. Trinitroaniline



18. Urea Nitrate



4.3 ผลการคำนวณค่ากำลังของวัตถุระเบิด

ผลการคำนวณความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดที่สภาวะ STP (V) และค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยวิธีการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย แสดงดังตารางที่ 6

4.4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและจากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test

ค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (%TNT) และค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test ซึ่งรวบรวมจาก [7] แสดงดังตารางที่ 7

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (%TNT) และจากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test (%TNT) ของวัตถุระเบิด 18 ชนิด แสดงดังภาพที่ 3 โดยจุดแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test (X) และค่ากำลังที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย (Y) ของวัตถุระเบิดแต่ละชนิด เส้นตรงแสดงบริเวณที่ค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test

ตารางที่ 6 ค่าความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) และกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี อย่างง่าย

ชื่อ	Q (kJ/kg)	V (dm ³ /g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)
AN	-1,483.00	0.980	48.22
HMX	-5,014.96	0.907	150.90
Dinitrobenzene	-4,033.31	0.666	89.12
DNT	-4,352.99	0.615	88.82
EthylNitrate	-5,165.05	0.862	147.71
HNS	-3,998.29	0.747	99.09
MethylNitrate	-5,965.97	0.873	172.79
NG	-6,233.73	0.715	147.87
Nitroglycol	-6,763.91	0.736	165.16
Nitromethane	-5,004.59	0.918	152.42
PETN	-5,794.84	0.780	149.96
Picric acid	-3,154.82	0.831	86.98

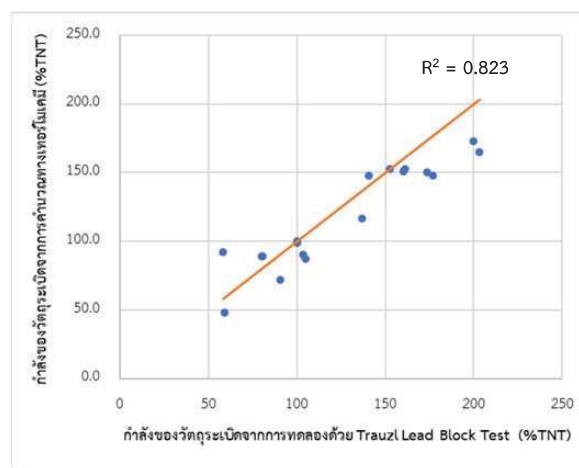
ตารางที่ 6 ค่าความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) และกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี อย่างง่าย (ต่อ)

ชื่อ	Q (kJ/kg)	V (dm ³ /g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)
RDX	-5,064.11	0.908	152.55
TATB	-3,557.11	0.781	92.17
Tetryl	-4,295.75	0.819	116.72
TNT	-4,073.27	0.740	100.00
Trinitroaniline	-3,693.29	0.786	90.30
Urea Nitrate	-2,390.41	0.910	72.17

ตารางที่ 7 กำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและจากการทดลองด้วยวิธี Trauzl Lead Block Test

ชื่อ	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (cm ³ /10g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (%TNT)
AN	48.22	178	59.33
HMX	150.90	480	160.00
Dinitrobenzene	89.12	242	80.67
DNT	88.82	240	80.00
EthylNitrate	147.71	422	140.67
HNS	99.09	301	100.33
MethylNitrate	172.79	600	200
NG	147.87	530	176.67
Nitroglycol	165.16	610	203.33
Nitromethane	152.42	458	152.67

ชื่อ	กำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณ (%TNT)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (cm ³ /10g)	กำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลอง (%TNT)
PETN	149.96	520	173.33
Picric acid	86.98	315	105.00
RDX	152.55	483	161.00
TATB	92.17	175	58.33
Tetryl	116.72	410	136.67
TNT	100.00	300	100
Trinitroaniline	90.30	311	103.67
Urea Nitrate	72.17	272	90.67

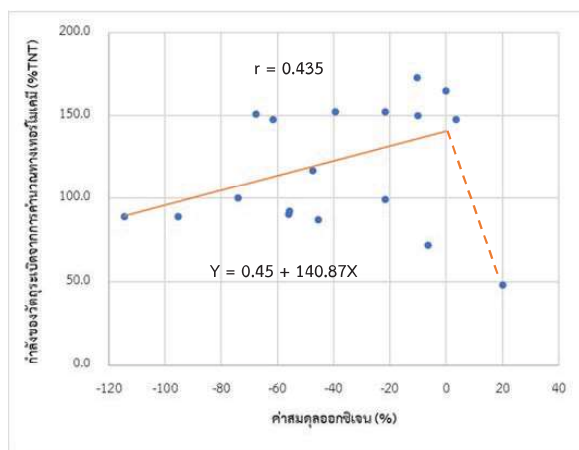


ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจากการทดลองด้วย Trauzl Lead Block Test

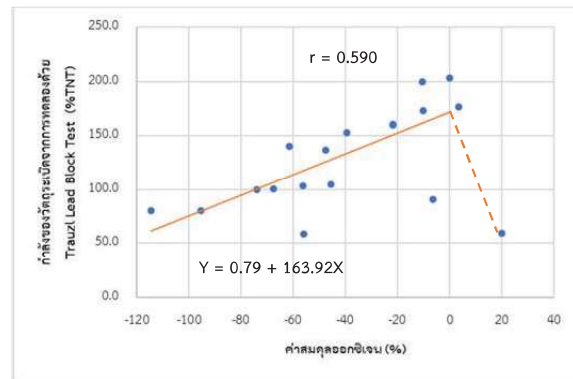
จากภาพที่ 3 พบว่าค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้ Trauzl Lead Block Test เป็นอย่างมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือ R^2 เท่ากับ 0.823 และมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error, MAE) เท่ากับ 14.51%

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนและกำลังของวัตถุระเบิด

กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจน (%) และกำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่ได้ทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจากการทดลอง Trauzl Lead Block Test แสดงดังภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยเส้นตรงแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนที่เป็นลบหรือศูนย์และกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากทั้งสองวิธีดังกล่าว โดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย สำหรับเส้นประใช้แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนที่มีค่าเป็นบวกและกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากทั้งสองวิธีดังกล่าว



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนและกำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจน (%) และกำลังวัตถุระเบิดจาก Trauzl Lead Block Test (%TNT)

จากการทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายด้วยการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย ($H_0: \beta_1 = 0, H_1: \beta_1 \neq 0$) พบว่าค่าสมมูลออกซิเจนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี ที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 ($t = 1.809, p\text{-value} = 0.092$) และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) เท่ากับ 0.435 (ดังแสดงในภาพที่ 4)

จากการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย ($H_0: \beta_1 = 0, H_1: \beta_1 \neq 0$) ของตัวแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายของกำลังของวัตถุระเบิดจากการทดลองด้วย Trauzl Lead Block Test พบว่าค่าสมมูลออกซิเจนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการทดลองด้วย Trauzl Lead Block Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($t = 2.736, p\text{-value} = 0.016$) และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.590 (ดังแสดงในภาพที่ 5)

ดังนั้นค่าสมมูลออกซิเจนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกำลังของวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและการทดลอง Trauzl Lead Block test นอกจากนี้ จากภาพที่ 4 และ 5 ยังพบว่าในกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นลบ กำลังของวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจาก Trauzl Lead Block Test จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และในกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นบวก กำลังของวัตถุระเบิดจากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ กำลังของวัตถุระเบิดจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีค่าสมมูลออกซิเจนเข้าใกล้หรือเท่ากับศูนย์

4.6 การนำวิธีการประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้เทอร์โมเคมีอย่างง่ายอธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO)

โดยทั่วไปวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่นิยมใช้ในงานทางด้านเหมืองแร่ และผู้ก่อการร้ายนิยมใช้ในการก่อความไม่สงบ จะมีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94% ต่อ 6% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลสนับสนุนการใช้อัตราส่วนผสมดังกล่าวได้ เนื่องจากส่วนผสมดังกล่าวมีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์ จึงทำให้ค่ากำลังของวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่มีส่วนผสมดังกล่าวมีค่ากำลังของวัตถุระเบิดที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายสูงสุด ซึ่งจะอธิบายตามลำดับดังนี้

4.6.1 การหาอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรทและน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้วัตถุระเบิดผสมที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์ ($\text{OB} = 0$)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมมูลออกซิเจนกับค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ทั้งที่ได้จากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและการทดลอง Trauzl Lead Block test พบว่าวัตถุระเบิดที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเข้าใกล้ศูนย์จะมีค่ากำลังของการระเบิดสูงสุด ดังนั้นในการออกแบบวัตถุระเบิดผสมระหว่าง

แอมโมเนียมไนเตรทกับน้ำมันเชื้อเพลิงจึงควรผสมในอัตราส่วนที่ทำให้สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดผสมมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยสมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดผสมหาได้โดยใช้สมการที่ 8

$$\text{OB}_{\text{mixed Ex}} = \frac{\% \text{Mass}_{\text{Ex1}} \times \text{OB}_{\text{Ex1}} + \% \text{Mass}_{\text{Ex2}} \times \text{OB}_{\text{Ex2}}}{100} \quad (8)$$

เมื่อ $\text{OB}_{\text{mixed Ex}}$ หมายถึง สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดผสม

OB_{Ex1} หมายถึง สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดชนิดที่ 1

OB_{Ex2} หมายถึง สมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดชนิดที่ 2

$\% \text{Mass}_{\text{Ex1}}$ หมายถึง % โดยมวลของวัตถุระเบิดชนิดที่ 1 ในวัตถุระเบิดผสม

$\% \text{Mass}_{\text{Ex2}}$ หมายถึง % โดยมวลของวัตถุระเบิดชนิดที่ 2 ในวัตถุระเบิดผสม

สามารถหาเปอร์เซ็นต์โดยมวลของแอมโมเนียมไนเตรทและน้ำมันเชื้อเพลิงในส่วนผสมของวัตถุระเบิด ANFO ที่มีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์ได้โดยแทนค่าสมมูลออกซิเจนของแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) เท่ากับ +20% และเนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด แต่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณในงานนี้จะใช้โมเลกุลของ CH_2 แทนน้ำมันเชื้อเพลิง [17] ซึ่งมีค่าสมมูลออกซิเจนจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2 เท่ากับ -342.86% จากนั้นแทนลงในสมการที่ 8 จะได้

$$0 = \frac{\% \text{Mass}_{\text{AN}} \times (+20) + \% \text{Mass}_{\text{Fuel}} \times (-342)}{100}$$

จะได้ $\% \text{Mass}_{\text{AN}}$ ในวัตถุระเบิดผสม ANFO = 94.5% และ $\% \text{Mass}_{\text{Fuel oil}} = 5.5\%$ ซึ่งประมาณการอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94% ต่อ 6% โดยน้ำหนัก

ซึ่งสอดคล้องกับส่วนผสมของ ANFO ที่มีใช้ทั่วไป [12], [13]

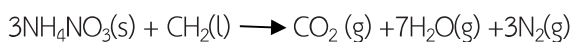
4.6.2 การประมาณค่ากำลังของวัตถุระเบิดผสม ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94.5% ต่อ 5.5% โดยน้ำหนัก โดยใช้การคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่าย สามารถทำได้ตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

(1) แปลงอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) 94.5% ต่อ 5.5% โดยน้ำหนัก ให้เป็นอัตราส่วนโดยโมลเพื่อให้ง่ายต่อการทำนายการเกิดผลิตภัณฑ์หลังการระเบิด

ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) เป็น 94.5% ต่อ 5.5% โดยน้ำหนัก สามารถเขียนในรูปอัตราส่วนโดยโมลเป็นจำนวนเต็มเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณได้เป็น NH_4NO_3 3 โมล ต่อ CH_2 1 โมล ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

(2) การทำนายผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

เนื่องจาก ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่าสมดุลออกซิเจนเป็นศูนย์ ดังนั้นในการทำนายผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดของ ANFO จึงทำนายตาม K-W rules ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดดังนี้



(3) การทำนายค่าความร้อนจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

เมื่อแทนค่าเอนทัลปี (ΔH_f°) ของการเกิด CO_2 , H_2O จากตารางที่ 3 ΔH_f° ของการเกิด NH_4NO_3 จากตารางที่ 5 และแทนค่า ΔH_f° ของ $\text{CH}_2 = -29.31 \text{ kJ/mol}$ [17] ลงในสมการที่ 3 จะได้ความร้อนจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่า $3,823.09 \text{ kJ/kg}$

(4) การทำนายปริมาตรของแก๊สที่เกิดจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

จากสมการเคมีของการทำนายผลิตภัณฑ์หลังการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) พบว่าหลังการระเบิดมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเกิดขึ้น 11 โมล คิดเป็นปริมาตรแก๊สที่สภาวะมาตรฐาน $11 \times 22.4 = 246.4 \text{ dm}^3$ ต่อ ANFO มวล 254 กรัม ดังนั้นปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่า $0.970 \text{ dm}^3/\text{g}$

(5) การหาค่าเปรียบเทียบ (%TNT) ของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$)

จากการแทนค่าความร้อนจากการระเบิดของ ANFO และ TNT ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิดของ ANFO และ TNT ลงในสมการที่ 5 จะได้กำลังวัตถุระเบิด (%TNT) ของ ANFO ($3 \text{ โมล } \text{NH}_4\text{NO}_3 + 1 \text{ โมล } \text{CH}_2$) มีค่า 121.93% ในทำนองเดียวกันสามารถหาสมดุลออกซิเจน (OB) ความร้อนจากการระเบิด (Q) ปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการระเบิด (V) และค่ากำลังของวัตถุระเบิด (Power) ของวัตถุระเบิดผสม ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) และน้ำมันเชื้อเพลิง (CH_2) ในอัตราส่วนอื่น ๆ ได้โดยใช้การคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบสมมูลออกซิเจนและค่ากำลังของวัตถุระเบิดของแอมโมเนียมไนเตรทและวัตถุระเบิดผสม ANFO ที่มีอัตราส่วนการผสมต่าง ๆ

วัตถุระเบิด	OB (%)	Q (kJ/kg)	V (dm ³ /g)	Power (%TNT)
NH ₄ NO ₃	+20.0	-1,483.00	0.980	48.20
ANFO (96.6% NH ₄ NO ₃ + 3.4% CH ₂)	+7.7	-2,897.80	0.974	93.64
ANFO (94.5% NH ₄ NO ₃ + 5.5% CH ₂)	0.0	-3,789.02	0.970	121.93
ANFO (92.0% NH ₄ NO ₃ + 8.0% CH ₂)	-9.0	-3,221.67	1.030	110.09
ANFO (89.6% NH ₄ NO ₃ + 10.4% CH ₂)	-17.7	3,327.99	1.003	110.74

จากตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบแอมโมเนียมไนเตรทมีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับ +20% เมื่อคำนวณกำลังของการระเบิดเทียบกับวัตถุระเบิดมาตรฐาน TNT โดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายพบว่าแอมโมเนียมไนเตรทมีค่ากำลังการระเบิด (%TNT) ประมาณ 48.20% เนื่องจากโมเลกุลแอมโมเนียมไนเตรท

มีปริมาณอะตอมออกซิเจนมากกว่าปริมาณอะตอมของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการทำให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดการออกซิเดชันสมบูรณ์ ออกซิเจนที่เป็นส่วนเกินจึงไม่ได้ช่วยเพิ่มพลังงานในการระเบิด ในขณะที่เมื่อเติมน้ำมันเชื้อเพลิง (CH₂) ลงไปในส่วนผสมวัตถุระเบิด ANFO จนได้วัตถุระเบิดผสมที่มีปริมาณ NH₄NO₃ ต่อ CH₂ เป็น 94.5% ต่อ 5.5% เป็นการเพิ่มอะตอมคาร์บอน (C) ที่เป็นเชื้อเพลิงลงไปในวัตถุระเบิดผสม ซึ่งปริมาณส่วนผสมดังกล่าวทำให้วัตถุระเบิดผสมมีค่าสมมูลออกซิเจนเท่ากับศูนย์ หมายความว่าปริมาณอะตอมของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการทำให้อะตอมของเชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดการออกซิเดชันสมบูรณ์มีปริมาณพอดีกันจึงเป็นอัตราส่วนที่ทำให้เกิดกำลังของการระเบิดสูงสุดในขณะที่ถ้าเติมน้ำมันเชื้อเพลิงลงไปในวัตถุระเบิดผสมมากขึ้นจะทำให้วัตถุระเบิดผสมมีค่าสมมูลออกซิเจนติดลบ หมายความว่า ปริมาณอะตอมของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการทำให้อะตอมของเชื้อเพลิงในวัตถุระเบิดเกิดการออกซิเดชันสมบูรณ์มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณอะตอมของเชื้อเพลิงทำให้มีอะตอมของเชื้อเพลิงเหลือ กำลังของวัตถุระเบิดจึงมีค่าน้อยลง ซึ่งผลการคำนวณที่แสดงไว้ข้างต้นสอดคล้องกับกราฟแสดงค่าของพลังงานที่สูญเสียไปใน ANFO เมื่อผสมน้ำมันเชื้อเพลิงกับแอมโมเนียมไนเตรทที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังที่ปรากฏในคู่มือของ Federal Highway Administration, US. Department of Transportation เรื่อง Rock Blasting and Overbreak Control [17] นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังสนับสนุนเงื่อนไขการทำนายผลิตภัณฑ์จากการระเบิดตาม K-W rules และ Modified K-W rules เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำนายกำลังของวัตถุระเบิดได้เป็นอย่างดี

5. สรุปและอภิปรายผล

การคำนวณหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดแรงสูงจำนวน 18 ชนิด โดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายพบว่า ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับการหาค่ากำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้วิธี Trauzl Lead Block Test เป็นอย่างมาก โดยเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่หาจากวิธีการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายกับค่ากำลังของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่หาโดยวิธี Trauzl Lead Block Test พบว่ากราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.827 และมีค่าคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 14.3% นอกจากนี้ค่าสมมูลออกซิเจนยังมีความสัมพันธ์กับกำลังวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายและจากการทดลองโดยวิธี Trauzl Lead Block Test โดยในกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นลบพบว่า กำลังของวัตถุระเบิดทั้งจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมีและจาก Trauzl Lead Block Test จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สำหรับกรณีที่ค่าสมมูลออกซิเจนมีค่าเป็นบวกกำลังของวัตถุระเบิดจากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มลดลง นั่นคือกำลังวัตถุระเบิดจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าสมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ W. C. Lothrop และ G. R. Handrick [5] ที่แสดงไว้ว่ากำลังของวัตถุระเบิดและอำนาจการฉีกขาดของวัตถุระเบิด (%TNT) ที่วัดโดยวิธี Trauzl Lead Block Test จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสมมูลออกซิเจนของวัตถุระเบิดติดลบน้อยลง และกำลังของวัตถุระเบิดและอำนาจการฉีกขาดของวัตถุระเบิด (%TNT) จะมีค่าสูงสุดเมื่อวัตถุระเบิดมีค่าสมมูลออกซิเจนเป็นศูนย์ นอกจากนี้วิธีการคำนวณกำลังของวัตถุระเบิดโดยใช้หลักการทางเทอร์โมเคมีอย่างง่ายยังสามารถอธิบายการออกแบบวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างแอมโมเนียมไนเตรท 94% ต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 6% ซึ่งเป็นวัตถุระเบิดผสมชนิด ANFO ที่มีกำลังของการระเบิดสูงที่สุดได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลสนับสนุนว่าข้อมูลจากการคำนวณทางเทอร์โมเคมี

อย่างง่ายและข้อมูลค่าสมมูลออกซิเจนสามารถใช้ในการทำนายกำลังของวัตถุระเบิดและออกแบบวัตถุระเบิดผสมได้

6. บรรณานุกรม

- (1) A. Bailey and S. G. Murray, "Explosives, Propellants and Pyrotechnics," Brassey's (UK) Ltd, pp. 55-57, (1989).
- (2) J. Akhavan, "The Chemistry of Explosives," 3rd ed. The Royal Society of Chemistry, pp. 74-102, (2004).
- (3) J.P. Agrawal, "High Energy Materials," John Wiley & Sons, pp. 17-33, (2010).
- (4) Department of the Army Technical Manual, "TM9-1300-214 Military Explosives," Washington D.C.: US Army, pp. 3-1-3-4, (1984).
- (5) W.C. Lothrop, and G.R. Handrick, "The relationship between performance and constitution of pure organic explosive compounds," Chemical Reviews, vol. 44, no. 3, pp. 419-445, doi: 10.1021/cr60139a001, (1949).
- (6) M.H. Keshavarz, M. Ghorbanifaraz, H. Rahimi, and M. Rahmani, "Simple pathway to predict the power of high energy materials," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 36, no. 5, pp. 424-429, doi: 10.1002/prep.201000083, (2011).
- (7) R. Meyer, J. Kohler, and A. Homburg, "Explosives," 6th ed. John Wiley & Sons, (2007).
- (8) A.R. Martin, and H. J. Yallop, "The correlation of explosive power with molecular structure," Journal of Applied Chemistry, vol. 9, no. 6, pp. 310-315, doi: 10.1002/jctb.5010090604, (2007).
- (9) M.H. Keshavarz, and F. Self, "Improved approach to predict the power of energetic Materials," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 38, no. 5, pp. 709-714, doi: 10.1002/prep.201200165, (2013).
- (10) W. P. Lai, P. Lian, Y. Z. Liu, T. Yu, W. L. Zhu, Z. X. Ge, and J. Lv, "Design and theoretical study of 15 novel high energy density compounds," Journal of Molecular Modeling, vol. 20, no. 11, doi: 10.1007/s00894-014-2479-y, (2014).
- (11) P. Lian, C. Kang, Y. X. Zhang, S. Chen, and W. P. Lai, "Theoretical study on new high energetic density compounds with high power and specific impulse," FirePhysChem, vol. 1, no. 2, pp.103-108, doi: 10.1016/j.fpc.2021.04.006, (2021).

- (12) M. Fabin, and T. Jarosz, "Improving ANFO: Effect of additives and ammonium nitrate morphology on detonation parameters," *Materials*, vol. 14, no. 19, doi: 10.3390/ma14195745, (2011).
- (13) P. Suppajariyawat, M. Elie, M. Baron, and J. Gonzalez-Rodriguez, "Classification of ANFO samples based on their fuel composition by GC-MS and FTIR combined with chemometrics," *Forensic Science International*, vol. 301, pp. 415-425, doi: 10.1016/j.forsciint.2019.06.001, (2019).
- (14) P. Kang, Z. Liu, H. Abou-Rachid, and H. Guo, "Machine-learning assisted screening of energetic materials," *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 124, no. 26, pp. 5341-5351, doi: 10.1021/acs.jpca.0c02647, (2020).
- (15) I. Sochet, D. Gardebas, S. Calderara, Y. Marchal, and B. Longuet, "Blast Wave parameters for Spherical Explosives Detonation in Free Air," *Open Journal of safety Science and Technology*, vol. 1 No. 2, pp. 31-42, doi: 10.4236/ojsst.2011.12004, (2011).
- (16) สุราณี อินทัยรุ่งรัตน์ และโกวิท ปิยะมั่งคณา, "การใช้สมมูลออกซิเจนเพื่อประเมินความเสี่ยงอันตรายทางความร้อนเบื้องต้นของวัตถุระเบิด," *วารสารวิจัยราชมนฑลกรุงเทพ*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, หน้า 83-92, มกราคม-มิถุนายน, (2564).
- (17) National Highway Institute, Federal Highway Administration, US. Department of Transportation, "Rock Blasting and Overbreak Control," pp. 1-13. (1991).