

การพัฒนาชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย

บุศราภรณ์ จิตรวัฒนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา


สิงหาคม 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

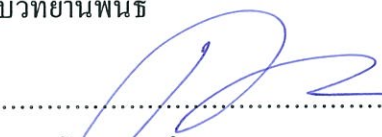
การศึกษาวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาระดับปริญญาโท
จากโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.)
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการ
ประจำปีการศึกษา 2556-2557


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ บุศราภรณ์ จิตรวิวัฒนะ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

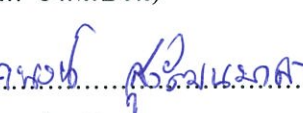

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ อีสโร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธาน
(ดร.ภาณุพล โขณฑกระโทก)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ อีสโร)


.....กรรมการ
(ดร.ณรงค์ อึ้งกิมบัววน)


.....กรรมการ
(ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา


.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่... 5 ...เดือน... สิงหาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ อิศโร อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา และ ดร.ณรงค์ อึ้งกิมบี้วัน ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และการทำวิจัย ตลอดหลักสูตร

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวิฑูรย์ จิตรวัธนะ คุณแม่สมปอง แก่นแก้ว และพี่ ๆ ทุกคนที่ให้การกำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูคุณเวทิตาแต่บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบนานเท่านานนี้

บุศราภรณ์ จิตรวัธนะ

56920166: สาขาวิชา: ฟิสิกส์ศึกษา; วท.ม. (ฟิสิกส์ศึกษา)

คำสำคัญ: พลังงานจลน์เฉลี่ย/ แก๊สอุดมคติ/ แก๊สอะตอมเดี่ยว/ แก๊สโมเลกุลคู่

บุคลากร รับผิดชอบ: การพัฒนาชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย (DEVELOPMENT APPARATUS ON A TOPIC OF AVERAGE KINETIC ENERGY OF GASES FOR HIGH SCHOOL STUDENTS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ชัยศักดิ์ อีสโร, Dr.rer.nat. 70 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

จุดมุ่งหมายของการวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ซึ่งเป็นหัวข้อหนึ่งในวิชาฟิสิกส์พื้นฐานที่ขาดการวัด และขาดการทำความเข้าใจของนักเรียน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำตัวอย่างการหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว (He, Ar) และแก๊สโมเลกุลคู่ (N_2 , O_2) ที่สามารถนำไปอธิบายการหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สต่าง ๆ ได้ โดยการออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อใช้ในการสอนนักเรียน ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของชุดทดลองถูกศึกษาโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี เงื่อนไขแรกของการศึกษานี้เพื่อยืนยันค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยจะมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่อุณหภูมิเดียวกันพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สโมเลกุลคู่มีค่ามากกว่าแก๊สอะตอมเดี่ยว ในแก๊สอะตอมเดี่ยวทั้งฮีเลียมและอาร์กอนมีค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยเกือบจะเท่ากัน และมีพฤติกรรมที่เกิดเช่นเดียวกับแก๊สโมเลกุลคู่ เมื่อทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติ ในเงื่อนไขที่สองเป็นการแสดงผลของพลังงานจลน์เฉลี่ยที่มีค่าคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันขณะอุณหภูมิคงที่ ในการทดลองนี้เลือกใช้ความดัน 3 ค่า ได้แก่ 1.2132×10^5 , 1.3132×10^5 และ 1.4132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร ผลการทดลองแสดงความชัดเจนต่อการเข้าใจได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยและอุณหภูมิของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีพฤติกรรมที่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 5% และค่าความถูกต้องของชุดทดลองประมาณ 95%

56920166: MAJOR: PHYSICS EDUCATION; M.Sc. (PHYSICS EDUCATION)

KEYWORDS: AVERAGE KINETIC/ IDEAL GASES/ MONATOMICGAS/ DIATOMIC GAS

BUSSARAPORN JITWATTANA: DEVELOPMENT APPARATUS ON A TOPIC OF AVERAGE KINETIC ENERGY OF GASES FOR HIGH SCHOOL STUDENTS. ADVISORY COMMITTEE: CHAISAK ISSRO, Dr.rer.nat. 70 P. 2016.

The aim of this research was to develop apparatus on a topic of average kinetic energy of gases for high school students. This is one of topic in fundamental physics that are difficultly measurement and student understanding. Therefore, we introduce an example to measure the average kinetic energy of monatomic (He, Ar) and diatomic (N_2 , O_2) gases. Here, it is help to determine the average kinetic energy by design and creation apparatus using for teaching student. The average kinetic energy, percentage deviation and percent accuracy of the experiment is studied to compare with theoretical results. First condition of this study is confirmed the average kinetic energy of gas that it is proportional to absolute temperature. The measurement is operated at the same temperature, as diatomic gases are indicated higher average kinetic energy than monatomic gases. Both He and Ar monatomic gases showed almost the same average kinetic energy and as well as diatomic gases behavior. When decreasing or increasing the temperature of both monatomic and diatomic gases is represented that the kinetic energy is closed to the theoretical behavior of idea gas. Second, the result showed that the average kinetic energy is constant due to pressure variation at the same temperature. In this experiment is selected to study determine kinetic energy in three initial pressures 1.2132×10^5 , 1.3132×10^5 and 1.4132×10^5 N/m^2 . From this experimental result is clear to understand the relation between the average kinetic energy and temperature of monatomic and diatomic gases with shown similar behavior. However, the deviation of result increase at low temperature and high temperature more than room temperature is in the error about 5% and the accuracy of the apparatus is 95%.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
แบบจำลองและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส.....	5
ทฤษฎีบทการแบ่งเท่าของพลังงาน.....	15
การเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมอุดมคติ.....	17
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
ศึกษา ค้นคว้าและสำรวจข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	23
ออกแบบและสร้างชุดทดลองในการวิจัย.....	23
ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล.....	28

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล.....	32
4 ผลการวิจัย.....	34
การออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส.....	34
การหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊ส โมเลกุลคู่ ที่อุณหภูมิต่างกัน	36
การหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊ส โมเลกุลคู่ ที่ความดันเริ่มต้น ของแก๊สต่างกัน.....	40
การเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊ส โมเลกุลคู่ กับค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	44
5 สรุปผลและอภิปรายผล.....	52
สรุปผล.....	52
อภิปรายผล.....	53
ข้อเสนอแนะ.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก.....	61
ภาคผนวก ข.....	68
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 จำนวนระดับชั้นความเสริของโมเลกุลแก๊ส (อุณหภูมิต่ำ).....	17
2-2 ค่าคงที่แวนเดอร์วาลส์ สำหรับแก๊สบางชนิด.....	20
4-1 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	37
4-2 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	37
4-3 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	38
4-4 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ความดันต่าง ๆ อุณหภูมิคงที่ 10°C	41
4-5 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ความดันต่าง ๆ อุณหภูมิคงที่ 25°C	41
4-6 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ความดันต่าง ๆ อุณหภูมิคงที่ 60°C	42
4-7 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	45
4-8 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	45
4-9 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	46
4-10 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	46
4-11 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	47
4-12 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	47
ก-1 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สฮีเลียม ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	62
ก-2 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	62
ก-3 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สฮีเลียม ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	63
ก-4 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	63
ก-5 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สฮีเลียม ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	64
ก-6 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	64
ก-7 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สไนโตรเจน ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-8 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สออกซิเจน ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	65
ก-9 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สไนโตรเจน ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	66
ก-10 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สออกซิเจน ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	66
ก-11 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สไนโตรเจน ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	67
ก-12 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สออกซิเจน ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	67
ข-1 การแปลงหน่วยค่าความดัน (Pressure conversion table).....	69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 โมเลกุลของแก๊สในภาชนะที่เคลื่อนที่.....	7
2-2 โมเลกุลของแก๊สเกิดการชนแบบยืดหยุ่น.....	9
2-3 การเคลื่อนที่ของแก๊ส (a) การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (b) การเคลื่อนที่แบบหมุน (c) การเคลื่อนที่แบบสั่น.....	16
2-4 กราฟระหว่าง PV/RT กับ P ของแก๊สต่าง ๆ.....	18
2-5 กราฟระหว่าง PV/RT กับ P ของแก๊สในโตรเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	18
2-6 การเคลื่อนที่เข้าชนผนังของโมเลกุลหนึ่ง.....	19
3-1 ชุดท่อบรรจุแก๊ส.....	24
3-2 ชุดฐานให้ความร้อน.....	25
3-3 แผ่นยึดติดอุปกรณ์.....	26
3-4 แผนผังต้นแบบชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส.....	27
3-5 ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส	29
4-1 ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย	34
4-2 ท่อบรรจุแก๊สและอุปกรณ์ประกอบประเภทวาล์วและเกจวัดความดัน.....	35
4-3 บีกเกอร์และฐานสำหรับให้ความร้อนกับท่อบรรจุแก๊ส.....	35
4-4 แผ่นยึดติดอุปกรณ์ชุดทดลอง.....	36
4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ต่าง ๆ ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	39
4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ต่าง ๆ ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ต่าง ๆ ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	40
4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับความดัน ที่อุณหภูมิ 10°C	43
4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับความดัน ที่อุณหภูมิ 25°C	43
4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับความดัน ที่อุณหภูมิ 25°C	44
4-11 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	48
4-12 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	49
4-13 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	49
4-14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส โมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	50
4-15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส โมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	50
4-16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส โมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$	51

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิชาฟิสิกส์เป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับการวัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกายภาพแล้วสรุปเป็นหลักการ ทฤษฎี กฎ ซึ่งนำไปสู่การสร้างเครื่องมือ อุปกรณ์ วิธีการ และความรู้ที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์และเทคโนโลยีต่าง ๆ (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555, หน้า 17) การเรียนการสอนในวิชาฟิสิกส์จึงต้องเปิดโอกาสให้นักเรียนเป็นผู้คิด และศึกษาค้นคว้าอย่างเป็นระบบ (กระทรวงศึกษาธิการ, 2551, หน้า 12) การทดลองภาคปฏิบัติจึงมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมให้นักเรียนเกิดความเข้าใจเนื้อหาในบทเรียนชัดเจนมากขึ้น ทั้งยังรู้จักคิดวิเคราะห์และแก้ปัญหา นำไปสู่การเกิดองค์ความรู้ใหม่ การจัดกิจกรรมการทดลองภาคปฏิบัติและมีชุดการทดลองที่เป็นสื่อการสอนที่ดีที่ก่อให้เกิดการเรียนรู้ นำมาซึ่งความเข้าใจ สามารถดำเนินการสังเกต รวบรวมข้อมูลตามขั้นตอนของกระบวนการแสวงหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์ นำไปสู่การสรุปความรู้ได้ (กระทรวงศึกษาธิการ, 2551, หน้า 6)

บทเรียนเรื่องทฤษฎีจลน์ของแก๊สเป็นเนื้อหาสำคัญส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย เนื้อหาบทเรียนได้กล่าวถึงแบบจำลองโมเลกุลของแก๊สอุดมคติ และพลังงานจลน์ของแก๊ส โดยแก๊สประกอบด้วยโมเลกุลซึ่งทำตัวเป็นอนุภาคแบบจุด ซึ่งขนาดโมเลกุลเล็กมากเมื่อเทียบกับระยะเฉลี่ยระหว่างอนุภาคและเมื่อเทียบกับขนาดของภาชนะ โมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา การเคลื่อนที่เป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ผลจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มอนุภาคจะชนกันเอง และจะชนกับผนังภาชนะที่บรรจุแก๊ส การที่แก๊สชนผนังของภาชนะแล้วสะท้อนออกมาจะมีผลต่อความดันของแก๊ส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอนุภาคของแก๊สจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น หากกำหนดให้ปริมาตรคงที่ ความดันจะเพิ่มขึ้นและถ้าอนุภาคของแก๊สอยู่ในที่ ๆ มีปริมาตรน้อย แก๊สนั้นก็จะกระทบกับผนังบ่อยขึ้นทำให้ความดันเพิ่มขึ้น จากทฤษฎีจลน์ของแก๊สพบว่าพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่เฉลี่ยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์เท่านั้น (ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2559, หน้า 499; สถาบันส่งเสริมการสอน

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555, หน้า 32; Assael, Martin, & Tsolakis, 1996, p. 641; Engel & Reid, 2010, p. 108; Pazun, 2012, p. 4; Vallance, 2008, p. 2) ดังนั้นการศึกษาพลังงานจลน์ของแก๊สแต่ละชนิดนักเรียนไม่สามารถสัมผัสหรือมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ไม่มีชุดทดลองเพื่อนำมาทดลองให้เห็นผลชัดเจนว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์เพียงอย่างเดียว (Imai, Kamata, & Miura, 2003, pp. 254-258; Lehtinen & Viiri, 2014, pp. 344-348) นอกจากนี้ยังไม่สามารถบอกความแตกต่างระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ได้

ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับทฤษฎีจลน์ของแก๊ส โดยทำการพัฒนาชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย เพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สต่างชนิดกัน โดยทำการทดลองกับแก๊สอะตอมเดี่ยว ได้แก่ แก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม แก๊สโมเลกุลคู่ ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎี ชุดการทดลองที่พัฒนาขึ้นนักเรียนได้เรียนรู้วิธีการทดลองและฝึกทักษะในการติดตั้งเครื่องมือ การใช้เครื่องมืออย่างถูกวิธี การอ่านค่าจากเครื่องมือวัด และการเก็บบำรุงรักษาเครื่องมือและอุปกรณ์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประกอบการจัดการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายให้มีประสิทธิภาพต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาโดยการออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส
2. เพื่อทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่อุณหภูมิต่างกัน
3. เพื่อทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน
4. เพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ จากการทดลองกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่
2. สามารถนำชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ไปใช้เป็นสื่อวัตกรรมการจัดการเรียนการสอนเรื่องทฤษฎีจลน์ของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย
3. ได้แนวทางในการออกแบบและพัฒนาการสร้างชุดทดลอง เพื่อนำไปใช้เป็นสื่อวัตกรรมการจัดการเรียนการสอนในหัวข้ออื่น ๆ ต่อไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. การพัฒนาชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สเป็นการออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว ได้แก่ แก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม และแก๊สโมเลกุลคู่ ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยบรรจุแก๊สภายในท่อสแตนเลสที่มีปริมาตร 426 ลูกบาศก์เซนติเมตร และชุดทดลองประกอบด้วยวัสดุอุปกรณ์ที่คงทน ใช้เครื่องมือวัดที่เหมาะสม

2. ทดสอบชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ทำการทดลองโดยบรรจุแก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียม แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ที่ค่าความดันเริ่มต้นแตกต่างกัน จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1.2132×10^5 , 1.3132×10^5 และ 1.4132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร พร้อมทั้งทำการวัดค่าความดันแก๊สในขณะทำการลดและเพิ่มอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิกงที่ 10, 20, 25, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ที่อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นต่างกัน

3. เปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียม แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน กับค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ที่อุณหภูมิของแก๊สมีค่าเท่ากับ 10, 20, 25, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส หมายถึง ชุดการทดลองที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่อุณหภูมิเดียวกันซึ่งจะมีค่าเท่ากัน โดยไม่

ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สและจำนวนโมเลกุล ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ชุดการทดลองสร้างจากวัสดุอุปกรณ์ที่คงทน โดยประกอบด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสม

2. ความถูกต้องของชุดทดลอง หมายถึง ความสามารถในการใช้งานได้ตรงตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 5% ซึ่งพิจารณาจากผลการทดลองจากชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ที่อุณหภูมิต่างกัน นำผลที่ได้จากการวัดค่าปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมเลกุลของแก๊ส มาคำนวณตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ สามารถแบ่งหัวข้อได้ตามรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส
2. ทฤษฎีบทการแบ่งเท่าของพลังงาน
3. การเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมอุดมคติ
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

แบบจำลองโมเลกุลของแก๊สอุดมคติ

โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมากอยู่ในขอบเขตหรือภาชนะที่จำกัด ถ้าลดขนาดของภาชนะที่บรรจุแก๊สให้เล็กลง โมเลกุลของแก๊สจำนวนเดิมก็ยังคงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แต่จะมีการกระทบกันบ่อยขึ้น เพราะ โมเลกุลแก๊สอยู่กันอย่างหนาแน่นและขณะเดียวกัน โมเลกุลมีการวิ่งชนภาชนะที่บรรจุอยู่ด้วย การวัดความเร็วของแต่ละโมเลกุลของแก๊สสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเท่าไรหรือชนกับโมเลกุลอื่น ๆ ก็ครั้งนั้นทำการศึกษาได้ยาก แต่สามารถคาดคะเนได้ว่าแก๊สจำนวนนั้นแสดงผลอย่างไร โดยสามารถคำนวณจากความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรของแก๊ส โดยอาศัยหลักการทางสถิติ โดยเรียกทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณนี้ว่าทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ความดันของแก๊สที่วัดได้นั้นเกิดขึ้นจากโมเลกุลของแก๊สวิ่งเข้าชนภาชนะอย่างนับครั้งไม่ถ้วน ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นพลังงานความร้อนจะถ่ายเทไปสู่โมเลกุลของแก๊ส ส่งผลทำให้โมเลกุลแก๊สมีความเร็วมากขึ้นจึงมีการชนภาชนะแรงขึ้นซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความดันในภาชนะนั้น ๆ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความดันของแก๊สก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ, 2541, หน้า 127; Howard, 2015, p. 488; Poisson, 2000, p. 12)

การพิจารณาองค์ประกอบของระบบ พบว่าสารต่าง ๆ ประกอบด้วยโมเลกุลและโมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ภายใต้กฎเกณฑ์ทางกลศาสตร์ ถ้ารวมผลของโมเลกุลทั้งหมดในระบบออกมาจะทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมหรือการเปลี่ยนแปลงของระบบนั้น ทฤษฎีจลน์ของแก๊สกล่าวถึงแก๊สอุดมคติ เพราะระบบที่พิจารณาโมเลกุลมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ในการหาสมการสถานะของแก๊สอุดมคติ พิจารณาระบบซึ่งประกอบด้วยโมเลกุล จึงต้องกล่าวถึงแบบจำลองโมเลกุลของแก๊สอุดมคติ (Molecular model of an ideal gas) ซึ่งมีข้อสมมติฐานดังนี้ (พินิติ รัตนานุกุลม, 2553, หน้า 8; Joseph, 2014, p. 49; Stephen, 2005, p. 12)

1. แก๊สประกอบด้วยอนุภาคซึ่งเรียกว่า โมเลกุล (molecule) โดยสมมติว่าแก๊สระบบหนึ่งมีโมเลกุลอยู่จำนวนมากเป็น N ตัว ดังนั้นค่าความหนาแน่นจำนวนโมเลกุลของแก๊สระบบหนึ่งซึ่งคือจำนวนโมเลกุลต่อปริมาตรของแก๊สระบบนั้นอาจจะมากถึง 10^{26} โมเลกุลต่อลูกบาศก์เมตร จึงมีผลต่อการประมาณเชิงสถิติได้เป็นอย่างดี

2. แต่ละโมเลกุลของแก๊สมีขนาดเล็กมากเปรียบเทียบกับปริมาตรของระบบแก๊สหรือปริมาตรของภาชนะที่บรรจุแก๊สไว้ หรือกล่าวได้ว่าระยะระหว่างโมเลกุลของแก๊สระบบหนึ่งมีค่ามากจนกระทั่งโมเลกุลของแก๊สเปรียบได้ว่าไร้โครงสร้าง หรือมีลักษณะเป็นมวลจุด (point mass)

3. ระบบแก๊สหนึ่งอยู่ในสมดุล โมเลกุลต่าง ๆ ของแก๊สภายในระบบมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) ตามลักษณะที่เรียกว่าการเคลื่อนที่บราวเนียน (Brownian motion) แต่ละโมเลกุลของระบบแก๊สดังกล่าวยังประพฤติตัวตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

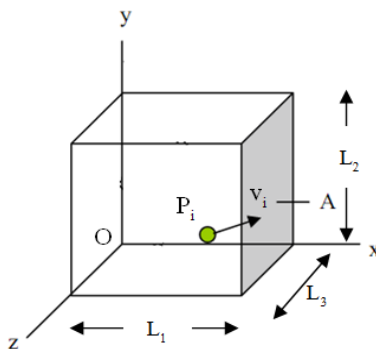
4. สำหรับระบบแก๊สปกติระบบหนึ่งจะไม่มีแรงภายนอกกระทำกับโมเลกุลของแก๊สระบบนั้น นอกจากผลที่เกิดจากการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ระหว่างโมเลกุลของแก๊สเอง โดยมีทั้งการอนุรักษ์พลังงานจลน์และการอนุรักษ์โมเมนตัม

5. สำหรับระบบแก๊สที่ประกอบด้วยแก๊สบริสุทธิ์ชนิดหนึ่ง ย่อมแสดงได้ว่าโมเลกุลของแก๊สภายในระบบดังกล่าวต่างคล้ายกัน

สมบัติของแก๊สอุดมคติตามแบบจำลองโมเลกุลที่ได้กล่าวสรุปไว้นี้ เน้นถึงการเคลื่อนที่และลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเป็นสำคัญ เมื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของแก๊สอุดมคติตามแบบจำลอง

โมเลกุลไปพิจารณาเชิงทฤษฎีเรียกว่า ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (kinetic theory of gas) และเรียกแบบจำลองโมเลกุลของแก๊สอุดมคติตามที่กล่าวนี้ว่า แบบจำลองทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (kinetic theory model of gas)

การพิจารณาความดันตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส เมื่อโมเลกุลของแก๊สในระบบหนึ่งกำลังเคลื่อนที่แบบสุ่ม โดยโมเลกุลตัวหนึ่งจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไปในทิศทางใดก็ได้ ซึ่งการพิจารณาโดยทั่วไปจะกล่าวถึงค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของทุกโมเลกุลในแก๊สระบบหนึ่ง โดยสมมติแก๊สภายในระบบมีโมเลกุลทั้งหมด N ตัว แต่ละตัวมีมวล m บรรจุอยู่ในภาชนะสี่เหลี่ยมมุมฉาก



ภาพที่ 2-1 โมเลกุลของแก๊สในภาชนะสี่เหลี่ยมมุมฉาก (สมพงษ์ ใจดี, 2551, หน้า 263)

จากภาพที่ 2-1 แก๊สมีโมเลกุลทั้งหมด N ตัว อยู่ในภาชนะที่มีปริมาตร $(V) = L_1L_2L_3$ เทียบกับระบบพิกัดฉาก (rectangular coordinate system) สมมติโมเลกุลตัวหนึ่ง (i) ของแก๊สมีความเร็ว v_i และมีความเร็วในแนวแกน x , y กับ z คือ v_{ix} , v_{iy} และ v_{iz} โดยมีขนาดเป็น v_{ix} , v_{iy} และ v_{iz} ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความเร็วของโมเลกุลเฉลี่ย (\bar{v}) อัตราเร็วของโมเลกุลเฉลี่ย (\bar{v}) และอัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ย ($\overline{v^2}$) ของโมเลกุล โดยให้ \bar{v}_x , \bar{v}_y และ \bar{v}_z แทนค่าเฉลี่ยความเร็วของโมเลกุล N ตัว ตามแนวแกน x , y และ z โดยมีขนาดเป็น \bar{v}_x , \bar{v}_y และ \bar{v}_z ตามลำดับ ซึ่งความเร็วในแต่ละแกนมีทั้งเครื่องหมายบวกและเครื่องหมายลบด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาผลรวมความเร็วของโมเลกุลทั้งหมดในแต่ละแกนย่อมมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น \bar{v}_x , \bar{v}_y และ \bar{v}_z จะเท่ากับศูนย์

$$\bar{v} = \bar{v}_x + \bar{v}_y + \bar{v}_z = 0 \quad (2-1)$$

สำหรับอัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ยของโมเลกุลตามแนวแกน x, y และ z มีค่าเท่ากันเนื่องมาจากการพิจารณาผลของระบบแก๊สในกล่องไปหนึ่งที่มีโมเลกุลจำนวนมากตามแบบจำลอง โมเลกุลของแก๊สอุดมคติ

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \quad (2-2)$$

จากสมการ (2-2) พิจารณาเทียบกับความเร็วเฉลี่ย (\bar{v}) ของโมเลกุลใด ๆ ซึ่งมี \bar{v}_x , \bar{v}_y และ \bar{v}_z เป็นความเร็วตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ จากทฤษฎีพีทาโกรัสจะได้

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (2-3)$$

สำหรับโมเลกุลตัวหนึ่ง (i) ซึ่งมีความเร็ว v_i ตามที่พิจารณาจะได้ดังนี้

$$v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2 \quad (2-4)$$

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วยกกำลังสองจะได้สมการ

$$\overline{v^2} = \frac{1}{N} \sum_i v_i^2 = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} \quad (2-5)$$

จากสมการ (2-2) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

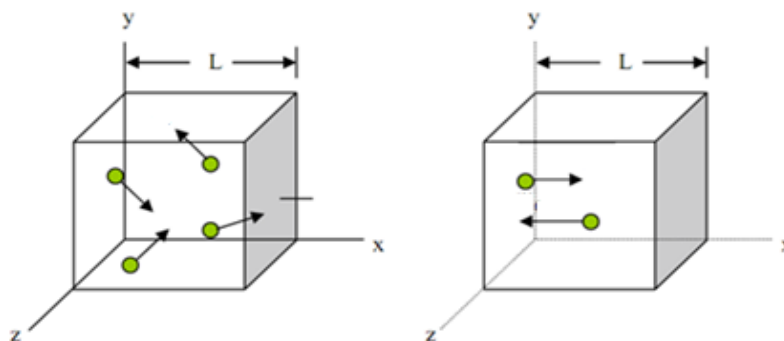
$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (2-6)$$

สมการ (2-6) แสดงว่าอัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ยของโมเลกุลเป็น 3 เท่าของอัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ยตามแนวแกน เนื่องจากความสมมูลของทิศทางตามแนวแกน x , y และ z ของระบบพิกัดฉาก

จากสมการแก๊สอุดมคติ $PV = nRT = Nk_B T$ พิจารณาความดันตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ซึ่งกล่าวถึงในลักษณะของแก๊สอุดมคติ โดยสมมติแก๊สอุดมคติระบบหนึ่งที่มีจำนวนโมเลกุล N ตัว แต่ละตัวมีมวล m อยู่ในกล่องลูกบาศก์ที่มีขนาด $L \times L \times L$ โดยมีแกน x , y และ z ขนานกับขอบภาชนะดังภาพที่ 2-2 ซึ่งโมเลกุลมีการเคลื่อนที่ชนกับผนังของกล่องแบบยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาขนาดของแรงที่โมเลกุลตัวหนึ่ง (i) กระทำกับด้านหนึ่งของกล่อง (F_i) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราของขนาดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมโดยโมเมนตัมที่เปลี่ยนไปเชื่อมโยงกับความเร็วมวลของโมเลกุลตัวนั้นในทิศทางของแกนหนึ่ง

สำหรับกรณีโมเลกุล N ตัว จะได้ขนาดของแรงสุทธิ (F) = $\sum F_i$ ดังนั้นค่าความดันจะสัมพันธ์กับขนาดของแรง ดังนี้

$$P = \frac{\sum F_i}{A} \quad (2-7)$$



ภาพที่ 2-2 โมเลกุลของแก๊สเกิดการชนแบบยืดหยุ่น (สมพงษ์ ใจดี, 2551, หน้า 267)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเฉพาะในแนวแกน x โดยให้องค์ประกอบความเร็วของโมเลกุลในแนวแกน x มีค่า v_x เมื่อโมเลกุลนี้ชนผนัง A_1 แบบยืดหยุ่น โมเลกุลจะกระดอนกลับออกมาใน

ทิศทางการชนข้ามด้วยความเร็ว v_x เท่าเดิม ดังภาพที่ 2-2 หลังจากชนผนัง A_1 แล้วโมเลกุลจะเคลื่อนที่กลับมาชนผนัง A_2 ซึ่งอยู่ตรงกันข้ามกับ A_1 โดยจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง L ต่อมาโมเลกุลจะกระดอนกลับจาก A_2 ในทิศทางการชนข้ามด้วยความเร็ว v_x เข้าชนผนัง A_1 อีกครั้ง ดังนั้นโมเลกุลจะชนผนัง A_1 ทุกช่วงเวลา $\Delta t = 2L/v_x$

เมื่อโมเลกุลมวล m เข้าชนผนัง A_1 ด้วยความเร็ว v_x และสะท้อนกลับด้วยความเร็ว $-v_x$ ในการชนผนังแต่ละครั้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม

$$\Delta(mv) = (-mv_x) - (mv_x) = -2mv_x \quad (2-8)$$

จากสมการ (2-8) ในการชนผนัง A_1 แต่ละครั้งจะทำให้เกิดขนาดของโมเมนตัมที่เปลี่ยนไปเท่ากับ $2mv_x$ และโมเลกุลนี้ชนผนัง A_1 ทุกช่วงเวลา $\Delta t = 2L/v_x$ แรงเฉลี่ยที่ผนังได้รับจากโมเลกุลเป็นดังนี้

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{mv_x^2}{L} \quad (2-9)$$

เนื่องจากโมเลกุลมีทั้งหมด N ตัว และมีการชนที่ผนังบ่อยครั้ง ดังนั้นแรงเฉลี่ยที่ผนังได้รับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วยกกำลังสองในแนวแกน x ของโมเลกุลทั้งหมด จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$F = \frac{m}{L} N \overline{v_x^2} \quad (2-10)$$

พิจารณาความดันแก๊สที่ผนังของภาชนะตามสมการ (2-7) ดังนั้นความดันแก๊สที่ผนัง A_1 ของภาชนะจะเป็นดังสมการ (2-11) โดยถ้าพิจารณาการชนของโมเลกุลที่ผนังในแนวแกน y และแนวแกน z จะได้ความดันเนื่องจากการชนมีค่าเท่ากัน

$$P = \frac{m}{V} N \overline{v_x^2} \quad (2-11)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2-6) และสมการ (2-11) จะได้

$$P = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{v^2}}{V} \quad (2-12)$$

หรือ
$$PV = \frac{1}{3} Nm\overline{v^2} \quad (2-13)$$

จากสมการ (2-13) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความดันและปริมาตรที่เป็นปริมาณมหัพภาค ในขณะที่อัตราเร็วโมเลกุลเฉลี่ยเป็นปริมาณจุลทรรศน์ ผลที่ได้จึงเชื่อมโยงระหว่างแนวคิดจุลทรรศน์ของโมเลกุลกับปริมาณที่วัดได้ทางมหัพภาค นอกจากนี้ถึงแม้ว่าในการพิจารณาได้สมมติแก๊สอุดมคติอยู่ภายในกล่องลูกบาศก์ จากสมการแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะของภาชนะที่บรรจุแก๊ส

พิจารณาพลังงานจลน์ของโมเลกุล (molecular kinetic energy) ในลักษณะพลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุล 1 ตัว หรือต่อโมเลกุล ($\overline{E_k}$) กล่าวคือ $(m\overline{v^2})/2$ ซึ่งเป็นพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เฉลี่ย (average translational molecular kinetic energy) โดยที่พลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ของโมเลกุล N ตัว คือ $E_k = N\overline{E_k}$ และในบางกรณีอาจกล่าวถึงพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ของโมเลกุล N ตัวต่อปริมาตร ซึ่งก็คือ (E_k/V) หรือ $(N\overline{E_k}/V)$ พิจารณาความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์โมเลกุลกับความดัน (P) หรืออุณหภูมิเคลวิน (T) ของแก๊สจากสมการ (2-12) จะได้

$$P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left(\frac{1}{2} m\overline{v^2} \right) \quad (2-14)$$

เมื่อ $\frac{1}{2} m\overline{v^2}$ คือ พลังงานจลน์เฉลี่ย ($\overline{E_k}$) ของแต่ละโมเลกุลในภาชนะ สมการเป็นดังนี้

$$P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{E_k} \quad (2-15)$$

และเมื่อ $N\overline{E_k}$ คือ พลังงานจลน์ของโมเลกุลทั้งหมดในภาชนะ จะได้สมการ

$$P = \frac{2}{3} \frac{E_k}{V} \quad (2-16)$$

จากสมการ (2-15) และ (2-16) แสดงให้เห็นว่าค่าความดันของแก๊สระบบหนึ่งซึ่งมีโมเลกุล N ตัว และมีปริมาตร V เป็นสัดส่วนกับจำนวนโมเลกุลต่อปริมาตรและพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เฉลี่ยของแก๊สระบบนั้น หรือกล่าวได้ว่าค่าความดันเป็นสัดส่วนกับพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ของโมเลกุลทั้งหมดต่อปริมาตร

สำหรับการพิจารณาเชื่อมโยงกับอุณหภูมิของแก๊สจะพิจารณาประกอบกับสมการของแก๊สอุดมคติ ดังนี้

$$\text{สมการแก๊สอุดมคติ} \quad PV = nRT = Nk_bT \quad (2-17)$$

$$\text{จะได้} \quad \overline{E_k} = \frac{1}{2} m\overline{v^2} = \frac{3}{2} k_bT \quad (2-18)$$

$$\text{หรือ} \quad T = \frac{2}{3k_b} \overline{E_k} = \frac{2}{3k_b} \left(\frac{1}{2} m\overline{v^2} \right) \quad (2-19)$$

จากสมการ (2-19) สรุปได้ว่าแก๊สประกอบด้วยโมเลกุลขนาดเล็กจำนวนมากที่เคลื่อนที่ตลอดเวลาตามแบบจำลองโมเลกุลของแก๊สอุดมคติ โดยอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สระบบหนึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เฉลี่ยของแก๊สระบบนั้น

นอกจากนี้สามารถใช้ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ยของโมเลกุลกับอัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ยตามแนวแกนดังสมการที่ (2-6) มาพิจารณาประกอบกับสมการ (2-18) ได้ดังนี้

$$\frac{1}{2} m(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}) = \frac{3}{2} k_bT \quad (2-20)$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{1}{2} m \overline{v_x^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_y^2} = \frac{1}{2} m \overline{v_z^2} = \frac{1}{2} k_b T \quad (2-21)$$

โดยถือว่าเป็นการแบ่งเท่ากัน (equipartition) ของพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เฉลี่ยตามแนวแกน x, y และ z ของระบบพิกัดฉาก

การพิจารณาปริมาณต่าง ๆ ตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส พบว่ามีปริมาณร่วมสำคัญที่แทนการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ของโมเลกุล คือ อัตราเร็วกำลังสองเฉลี่ย ($\overline{v^2}$) โดยที่ค่า $(\overline{v^2})^{1/2}$ หรือ $\sqrt{\overline{v^2}}$ แทนลักษณะหนึ่งของอัตราเร็วเฉลี่ยและเรียกว่าอัตราเร็วรากกำลังสองเฉลี่ย (root mean square speed “ v_{rms} ”) ของโมเลกุล

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} \quad (2-22)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาค่าอัตราเร็วรากกำลังสองเฉลี่ย (v_{rms}) ของโมเลกุลได้จากสมการ (2-18) และ (2-22) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\overline{E_k} = \frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{3}{2} k_b T \quad (2-23)$$

ถ้าทราบมวลของโมเลกุล 1 ตัว จะสามารถคำนวณ v_{rms} ที่อุณหภูมิ T ของโมเลกุลได้ ดังสมการนี้

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_b T}{m}} \quad (2-24)$$

เนื่องจาก $M = mN_A$ และ $R = k_b N_A$ จะได้

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (2-25)$$

จากสมการ $PV = Nk_bT$ เมื่อ k_b คือค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ และสำหรับแก๊สชนิดหนึ่งมวลของ 1 โมเลกุล (m) มีค่าคงตัว แสดงว่า v_{rms} เป็นสัดส่วนกับ $(T)^{1/2}$ จากสมการ (2-23) พลังงานจลน์ การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เฉลี่ย ($\overline{E_k}$) มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่โดยทั่วไป เพียงแต่ต้องใช้อัตราเร็วรากกำลังสองเฉลี่ย (v_{rms}) แทนอัตราเร็วโมเลกุล (v) ตามปกติ จึงถือได้ว่าความสัมพันธ์ที่พิจารณาได้นี้มีเอกลักษณ์ของพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เป็นอย่างดี

โดยตามปกติมักกล่าวถึงอัตราเร็วโมเลกุลเฉลี่ย (\bar{v}) จึงสามารถคำนวณหาอัตราเร็วโมเลกุลเฉลี่ยกำลังสอง ($\overline{v^2}$) ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามพบว่ามีสมมติฐาน $\overline{v^2}$ ด้วย $(\bar{v})^2$ เนื่องจากการศึกษาระบบแก๊สต่างๆ ตามทฤษฎีจลน์นั้นมีการพิจารณาแก๊สระบบหนึ่งซึ่งมีความหนาแน่นจำนวนโมเลกุลเชิงปริมาตรที่มากถึง 10^{26} ตัวต่อลูกบาศก์เมตร จึงถือได้ว่า $\overline{v^2} \cong (\bar{v})^2$ และสามารถพิสูจน์ได้ว่าตามปกติแล้ว $\overline{v^2} \geq (\bar{v})^2$ เสมอ โดยสมมติค่าอัตราเร็วโมเลกุล (v) ต่าง ๆ กันหาอัตราเร็วโมเลกุลเฉลี่ยได้เป็น \bar{v} และมีการเบี่ยงเบน (deviation) ของอัตราเร็วโมเลกุลจากค่าอัตราเร็วโมเลกุลเฉลี่ยคือ $\Delta v = v - \bar{v}$ ซึ่งได้ $\overline{(\Delta v)^2} \geq 0$ มีค่าเป็นบวกเสมอและเรียกว่าการกระจาย (dispersion) ของ v ในที่นี้คือค่าอัตราเร็วโมเลกุลตามที่สมมติ

$$\begin{aligned} \text{แสดงว่า} \quad \overline{(\Delta v)^2} &= \overline{(v - \bar{v})^2} = \overline{v^2 - 2v\bar{v} + (\bar{v})^2} \\ &= \overline{v^2} - 2(\bar{v})^2 + (\bar{v})^2 \\ &= \overline{v^2} - (\bar{v})^2 \geq 0 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \overline{v^2} \geq (\bar{v})^2 \quad (2-26)$$

โดยสังเกตว่าสามารถใช้ความสัมพันธ์ดังสมการ (2-26) นี้กับปริมาณต่าง ๆ ได้เสมอโดยไม่จำเป็นต้องเป็นอัตราเร็วโมเลกุลตามที่สมมติ

ทฤษฎีบทการแบ่งเท่าของพลังงาน

ทฤษฎีบทการแบ่งเท่าของพลังงาน (equipartition of energy theorem) ที่ครอบคลุมทั้งกรณีแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊สโมเลกุลคู่ ซึ่งมีใจความว่าแต่ละระดับของความอิสระจะทำให้เกิดพลังงานขึ้นในระบบเท่ากับ $(k_b T)/2$ โดยระดับของความอิสระที่มีความเป็นไปได้จะต้องมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ การเคลื่อนที่แบบหมุน และการเคลื่อนที่แบบสั่นของโมเลกุล (ประธาน นุรณศิริ และคณะ, 2558, หน้า 624)

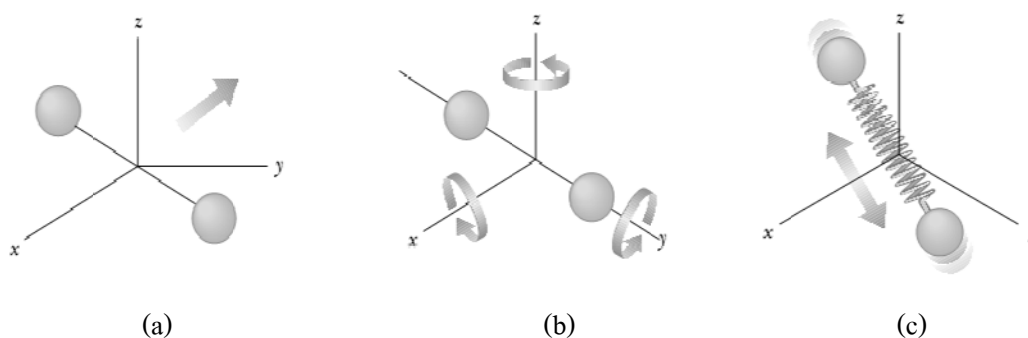
จากสมการ (2-21) $(m\overline{v_x^2})/2 = (m\overline{v_y^2})/2 = (m\overline{v_z^2})/2 = (k_b T)/2$ ในขณะที่สมการ (2-18) คือ $\overline{E_k} = (m\overline{v^2})/2 = (3k_b T)/2$ ซึ่งผลที่ได้ขึ้นอยู่กับความสมมูลของ 3 ทิศทางตามแนวแกน x, y และ z ของระบบพิกัดฉาก (x, y, z) นั่นเอง อย่างไรก็ตามสามารถกำหนดทิศทางของแกนเหล่านี้ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของระบบแก๊สที่พิจารณา เมื่อพิจารณาตัวประกอบ 3 ในพจน์ $(3k_b T)/2$ ที่เกี่ยวข้องกับระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) 3 ทิศทางสำหรับการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ของอะตอมเดี่ยวในแต่ละระดับขั้นความเสรีนั้นสอดคล้องกับค่าพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ ซึ่งเป็นพลังงานกลในแต่ละแกน แล้วมีผลต่อค่าพลังงานกลของแก๊สอะตอมเดี่ยวตัวนั้น ด้วยเหตุนี้แก๊สอุดมคติอะตอมเดี่ยวซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3 จึงมีค่าพลังงานกลเฉลี่ย (average molecular mechanical energy “ \overline{E} ”) เท่ากับค่าพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เฉลี่ย ($\overline{E_k}$) แสดงได้ดังสมการ $\overline{E} = \overline{E_k} = (3k_b T)/2$ (Syndicate & Hart, 2002, p. 640)

ถ้า η แทนค่าระดับขั้นความเสรีของโมเลกุลแต่ละตัวในระบบแก๊สอุดมคติระบบหนึ่ง ซึ่งมีสมมูลความร้อน η อุณหภูมิ T เคลวิน ดังนั้นสามารถเขียนพลังงานกลเฉลี่ย (\overline{E}) ตามที่เรียกว่า ทฤษฎีบทการแบ่งเท่าของพลังงาน ได้ดังนี้

$$\overline{E} = \eta \left(\frac{1}{2} k_b T \right) \quad (2-27)$$

เมื่อพิจารณาการแบ่งเท่าของพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เฉลี่ยสำหรับแก๊สอะตอมเดี่ยว เช่น แก๊สฮีเลียม แก๊สนีออน และแก๊สอาร์กอน ขึ้นต่อไปจะพิจารณาพลังงานกลของแก๊สโมเลกุลคู่ มีแผนภาพดังภาพ 2-3 การพิจารณาจะแยกเป็น 3 ส่วนคือ พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่

พลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบหมุน (rotation kinetic energy) และพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบสั่น (vibration) ของอะตอมทั้งคู่



ภาพที่ 2-3 การเคลื่อนที่ของแก๊ส (a) การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (b) การเคลื่อนที่แบบหมุน (c) การเคลื่อนที่แบบสั่น (Richet, 2001, p. 320)

นอกจากระดับขั้นความเสรีที่เท่ากับ 3 เนื่องจากการเลื่อนศูนย์กลางมวลของแก๊ส โมเลกุลคู่ 1 ตัว ตามแนวแกนทั้งสามของระบบพิกัดฉาก เช่นเดียวกับผลของแก๊สอะตอมเดี่ยว 1 ตัว แล้วแก๊ส โมเลกุลคู่ตัวนี้สามารถหมุนรอบแกน 2 แกนที่ตั้งฉากกันซึ่งผ่านศูนย์กลางมวล และตั้งฉากกับแนวต่อของอะตอมทั้งคู่ด้วย เช่น ขณะที่อะตอมทั้ง 2 ตัว อยู่บนแกน x โมเลกุลคู่จะหมุนได้ทั้งรอบแกน y และแกน z จึงทำให้เกิดพลังงานจลน์การเคลื่อนที่แบบหมุน โดยมีผลต่อระดับขั้นความเสรีเพิ่มขึ้นอีก 2 ตามลักษณะดังกล่าวนี้แก๊สโมเลกุลคู่ซึ่งมีอุณหภูมิ T เคลวิน จึงมีพลังงานกลเฉลี่ย (E) เป็น $(5k_bT)/2$

ถ้าพิจารณาการสั่นของโมเลกุลคู่ตัวนี้ด้วย ย่อมมีผลต่อระดับขั้นความเสรีอีก 2 อัน เนื่องจากพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ และพลังงานศักย์จากอันตรกิริยาของอะตอมทั้งสองในโมเลกุลตัวนั้น ดังนั้นแก๊สโมเลกุลคู่ 1 ตัว มีพลังงานกลเฉลี่ย (E) มากถึง $(7k_bT)/2$ ซึ่งเป็นผลจากระดับขั้นความเสรีของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ การเคลื่อนที่แบบหมุน และการเคลื่อนที่แบบสั่นเท่ากับ 3, 2 และ 2 ตามลำดับ สำหรับโมเลกุลหลายอะตอมก็สามารถพิจารณาได้ตามกระบวนการที่คล้ายกันนี้ แต่โดยปกติมักไม่กล่าวถึงระดับขั้นความเสรีที่เกี่ยวกับการสั่น

ตารางที่ 2-1 จำนวนระดับชั้นความเสริของโมเลกุลแก๊ส (อุณหภูมิต่ำ) (สมพงษ์ ใจดี, 2551, หน้า 273)

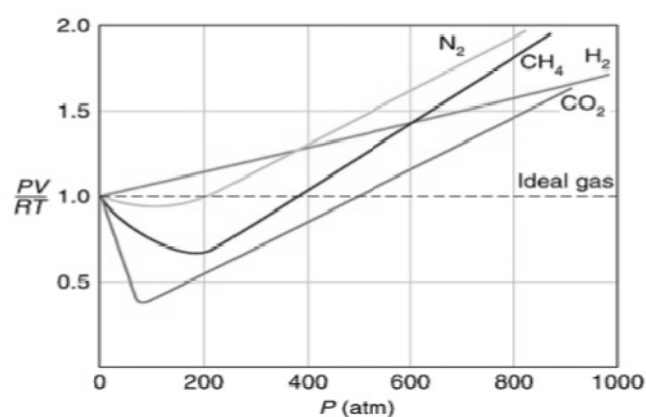
ชนิดโมเลกุลแก๊ส	ระดับชั้นความเสริ		
	การเลื่อน	การหมุน	สุทธิ (η)
อะตอมเดี่ยว	3	0	3
โมเลกุลคู่	3	2	5
หลายอะตอม	3	3	6

การเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมอุดมคติ

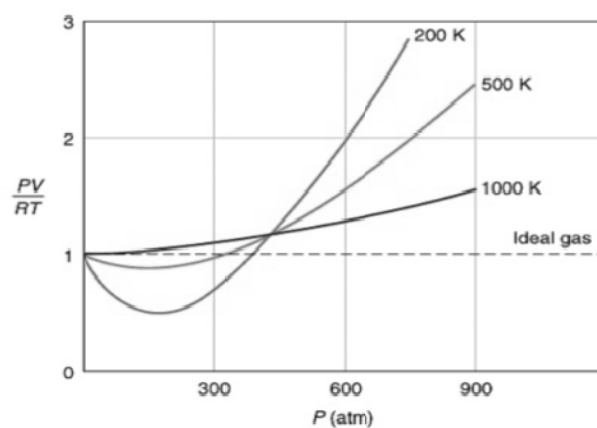
กฎของแก๊สและทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊สมีสมมติฐานว่าโมเลกุลที่อยู่ในสถานะแก๊สไม่มีแรงกระทำต่อกัน ไม่ว่าจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก สมมติฐานอีกข้อหนึ่ง คือ ปริมาตรของโมเลกุลนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรของภาชนะ แก๊สที่มีสมบัติเป็นไปตามสมมติฐานทั้งสองข้อนี้จะแสดงพฤติกรรมอุดมคติ (William, 2003, p. 7) แม้ว่าจะตั้งสมมติฐานได้ว่าแก๊สจริงมีพฤติกรรมคล้ายแก๊สอุดมคติ แต่ก็ไม่สามารถคาดหวังได้ว่าแก๊สจริงจะมีพฤติกรรมดังกล่าวภายใต้ทุกสภาวะ (ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย, ยุทธนา ตันติรุ่งโรจน์ชัย, ทินกร เตียนสิงห์ และพรสวรรค์ อมรศักดิ์ชัย, 2556, หน้า 620)

จากภาพที่ 2-4 แสดงกราฟระหว่าง PV/RT กับ P สำหรับแก๊สจริง 4 ชนิด และแก๊สอุดมคติที่อุณหภูมิต่ำ กราฟนี้ใช้ในการทดสอบการแสดงพฤติกรรมอุดมคติของแก๊ส จากสมการแก๊สอุดมคติ (สำหรับแก๊ส 1 โมล) ค่า PV/RT เท่ากับ 1 ไม่ว่าความดันที่แท้จริงของแก๊สจะเป็นเท่าไรก็ตาม แต่สำหรับแก๊สจริงเหตุการณ์นี้จะเป็จริงที่ความดันปานกลาง ($\leq 5 \text{ atm}$) เท่านั้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะมีการเบี่ยงเบนออกจากพฤติกรรมอุดมคติอย่างมาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจะเกิดขึ้นในระยะที่ค่อนข้างสั้น ที่ความดันบรรยากาศโมเลกุลของแก๊สจะอยู่ห่างกันมากทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่าน้อยมากจนไม่มีผล ที่ความดันสูงส่งผลให้ความหนาแน่นของแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงโมเลกุลอยู่ใกล้กันมากขึ้นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลจึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ทำให้แก๊สมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นอุดมคติ และจากภาพที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PV/RT กับ P ของแก๊สในโตรเจนเมื่อ

ความดันเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเส้นกราฟที่ได้จะแตกต่างกันไป โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เส้นกราฟจะใกล้เคียงกับเส้นกราฟของแก๊สอุดมคติมากขึ้น



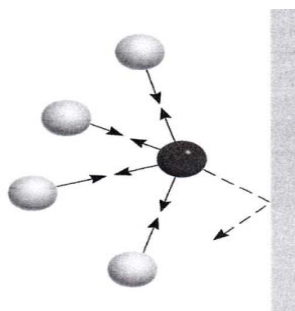
ภาพที่ 2-4 กราฟระหว่าง PV/RT กับ P ของแก๊สต่าง ๆ (Chad, 2010, p. 6)



ภาพที่ 2-5 กราฟระหว่าง PV/RT กับ P ของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่างกัน (Chad, 2010, p. 7)

การสังเกตพฤติกรรมที่ไม่เป็นอุดมคติอีกวิธีหนึ่งคือการลดอุณหภูมิของแก๊ส การทำให้เย็นตัวจะทำให้พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลลดลง ซึ่งมีลักษณะคล้ายการลดพลังงานของโมเลกุลในการเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างกัน

ดังนั้นเพื่อให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของแก๊สจริงได้อย่างถูกต้อง จึงจำเป็นต้องแก้ไขสมการแก๊สอุดมคติ โดยต้องคำนึงถึงแรงระหว่างโมเลกุลและปริมาตรของโมเลกุล ผู้ที่ทำการวิเคราะห์เป็นคนแรก คือ โจฮันส์ แวนเดอร์วาลส์ (Johannes van der Waals) ช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของแก๊สจริงในระดับโมเลกุล



ภาพที่ 2-6 การเคลื่อนที่เข้าชนผนังของโมเลกุลหนึ่ง (Mark, 2013, p. 10)

พิจารณาการเคลื่อนที่เข้าชนผนังของโมเลกุลหนึ่ง ดังภาพที่ 2-6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากโมเลกุลรอบ ๆ ทำให้แรงชนบนผนังที่เกิดจากโมเลกุลที่กำลังพิจารณาอยู่นี้มีค่าน้อยลง ผลรวมทั้งหมด คือ ความดันของแก๊สจริงต่ำกว่าความดันของแก๊สอุดมคติ แวนเดอร์วาลส์ได้เสนอว่าความดันที่เกิดขึ้นจากแก๊สอุดมคติ P_{ideal} จะสัมพันธ์กับความดันที่วัดได้จริง (David, 2011, p. 53) ตามสมการ

$$P_{ideal} = P_{real} + \frac{an^2}{V^2} \quad (2-28)$$

เมื่อ a เป็นค่าคงที่, n คือ จำนวนโมล และ V คือ ปริมาตรของภาชนะ ค่าของ an^2/V^2 คือแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ทำให้แก๊สมีพฤติกรรมเบี่ยงเบนออกไปขึ้นอยู่กับความถี่ที่โมเลกุลคู่ใด ๆ จะ

เข้าใกล้กันมาก ความถี่นี้เพิ่มขึ้นตามกำลังสองของจำนวนโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตร เนื่องจากโอกาสที่จะพบแต่ละโมเลกุลใน 2 โมเลกุลนั้นภายในพื้นที่ใด ๆ เป็นสัดส่วนกับ n/V สำหรับ a นั้นเป็นเพียงค่าคงที่ของการแปรผัน การแก้ไขอีกอย่างนั้นเกี่ยวข้องกับการที่โมเลกุลของแก๊สมีปริมาตร ในสมการแก๊สอุดมคติ V แทนปริมาตรของภาชนะ อย่างไรก็ตามแต่ละโมเลกุลของแก๊สมีปริมาตรค่าหนึ่ง แม้ว่าจะน้อยก็ตาม ดังนั้นปริมาตรที่แท้จริงของแก๊สจะเท่ากับ $(V-nb)$ เมื่อ n คือ จำนวน โมลของแก๊ส และ b เป็นค่าคงที่ nb แทนปริมาตรที่ครอบครองโดยแก๊สจำนวน n โมล สามารถเขียนสมการแก๊สอุดมคติในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (2-29)$$

สมการที่ 2-29 (Mario, Evgeny, & Pogliani, 2007, p. 1438) แสดงความสัมพันธ์ของ P , V , T และ n สำหรับแก๊สที่ไม่เป็นอุดมคตินี้เรียกว่า สมการแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals equation) ค่าคงที่แวนเดอร์วาลส์ a และ b ของแก๊สต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 2-2 เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2-2 ค่าคงที่แวนเดอร์วาลส์ สำหรับแก๊สบางชนิด (Mario et al., 2007, p. 1449)

แก๊ส	a ((atm. L ²)/mol ²)	b (L/mol)
He	0.034	0.0237
Ne	0.211	0.0171
Ar	1.34	0.0322
Kr	2.32	0.0398
H ₂	0.244	0.0266
N ₂	1.39	0.0391
O ₂	1.36	0.0318
Cl ₂	6.49	0.0562

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้าเพื่อการออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ซึ่งต้องเข้าใจวัตถุประสงค์ และแนวทางการออกแบบการสร้างชุดทดลอง เพื่อให้สามารถนำไปใช้ใน ห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

พรวดี มโนพญา (2545) สร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาสมบัติและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ศึกษา ประสิทธิภาพของชุดทดลอง ให้ได้ตรงตามกฎและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ประเมินคุณภาพชุดทดลองและ หาประสิทธิภาพของชุดทดลองในการเรียนการสอน โดยชุดทดลองประกอบด้วยชุดทดลองศึกษา สมบัติของแก๊สในเรื่อง กฎของบอยล์ กฎของชาร์ล กฎรวมของแก๊ส และชุดทดลองเพื่อศึกษาทฤษฎี จลน์ของแก๊ส ผลการวิจัยสรุปได้ว่าชุดทดลองเพื่อศึกษาสมบัติและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส พบว่ามี ประสิทธิภาพตรงตามสมบัติและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ซึ่งชุดทดลองมีคุณภาพในระดับดี ตามเกณฑ์ที่ กำหนด และมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ 80/80

สมชาย เกียรติกมลชัย (2548) สร้างชุดสาธิตทางฟิสิกส์สำหรับการสอนวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 โดยครอบคลุมเนื้อหาเรื่อง คลื่นกลในตัวกลางยืดหยุ่น เสียง ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส อุณหพลศาสตร์ ปรากฏการณ์ขนส่ง และของไหล ชุดสาธิตแสดงให้เห็นถึงสมบัติความเป็นคลื่นของเสียงที่ต้องอาศัย ตัวกลางในการเคลื่อนที่ สมบัติการแทรกสอด และสมบัติการสะท้อน ชุดสาธิตด้านพลังงานความร้อน เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลของการส่งผ่านพลังงานความร้อนในรูปของการนำ การพา และการแผ่รังสี นอกจากนี้ผลของพลังงานความร้อนยังสามารถทำให้วัตถุหดตัวได้ด้วย ที่มาของความดันแก๊สถูกจำลอง ด้วยการกระดอนของเม็ดแก้วภายในภาชนะปิด ชุดสาธิตได้ถูกทดสอบและได้ผลดีตรงตามทฤษฎี แต่ ชุดสาธิตมีขนาดเล็กและจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาเพื่อให้เหมาะกับชั้นเรียนขนาดใหญ่ต่อไป

Imai, Kamata and Miura (2003, pp. 254-258) ได้ทำการศึกษาเครื่องมือการเรียนการสอน สำหรับเรื่องการเคลื่อนที่ของโมเลกุล โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ TTMK (Teaching Tool for Molecular Kinetics) เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊ส เนื่องจากการจัดการเรียนการสอนเรื่อง การเคลื่อนที่ของแก๊สเป็นเรื่องที่ยากต่อการเข้าใจของนักเรียน ดังนั้นเครื่องมือทั่วไปไม่สามารถอธิบาย ในระดับจุลทรรศน์ได้ ผลการวิจัยพบว่าสามารถใช้ประกอบการเรียนการสอนได้ดีในชั้นเรียนสำหรับ ครูและนักเรียน

Lehtinen and Viiri (2014, pp. 344-348) ได้ทำการศึกษาการวาดภาพประกอบบทเรียนเรื่อง ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส โดยใช้แท็บเล็ตเป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการเรียนสอนสำหรับนักเรียนชั้น มัธยมศึกษาตอนปลาย การวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ภาพวาดเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของการเรียนรู้ วิทยาศาสตร์ ภาพวาดที่วาดประกอบบทเรียนบนกระดาน หรือการใช้กระดาษและดินสอในการวาด ภาพไม่ได้รับความสนใจมากในห้องเรียนวิชาฟิสิกส์ จึงนำเสนอวิธีการวาดภาพ และการอภิปรายภายใน กลุ่มโดยการใช้แท็บเล็ต การวิจัยนี้เป็นการนำเสนอความคิดสำหรับครูผู้สอนเกี่ยวกับการวาดภาพใน มุมมองใหม่

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส โดยการออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งวิธีดำเนินงานของงานวิจัยนี้ออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. ศึกษา ค้นคว้าและสำรวจข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ออกแบบและสร้างชุดทดลองในการวิจัย
3. ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล
4. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

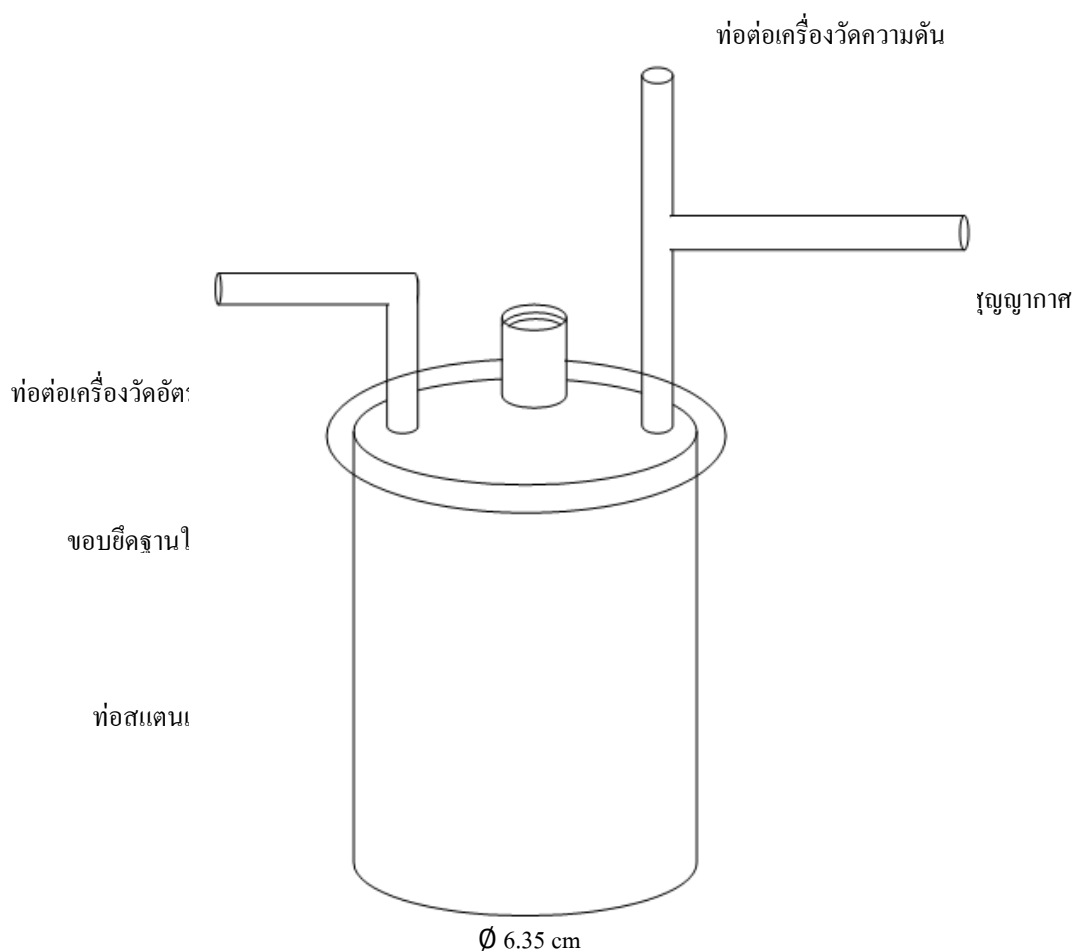
ศึกษา ค้นคว้าและสำรวจข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของแก๊ส แบบจำลองและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส และการหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับชุดทดลองเพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สต่างชนิดกัน
3. ศึกษาวิธีการออกแบบชุดทดลอง การสร้างชุดทดลอง หน้าที่ของอุปกรณ์ในชุดทดลอง แก๊สที่นำมาใช้ในการทดลอง เครื่องมือวัดประกอบการทดลอง และวิธีการดำเนินการทดลอง
4. ศึกษาเปรียบเทียบและวิธีการวิจัยจากเอกสาร งานวิจัยต่าง ๆ

ออกแบบและสร้างชุดทดลองในการวิจัย

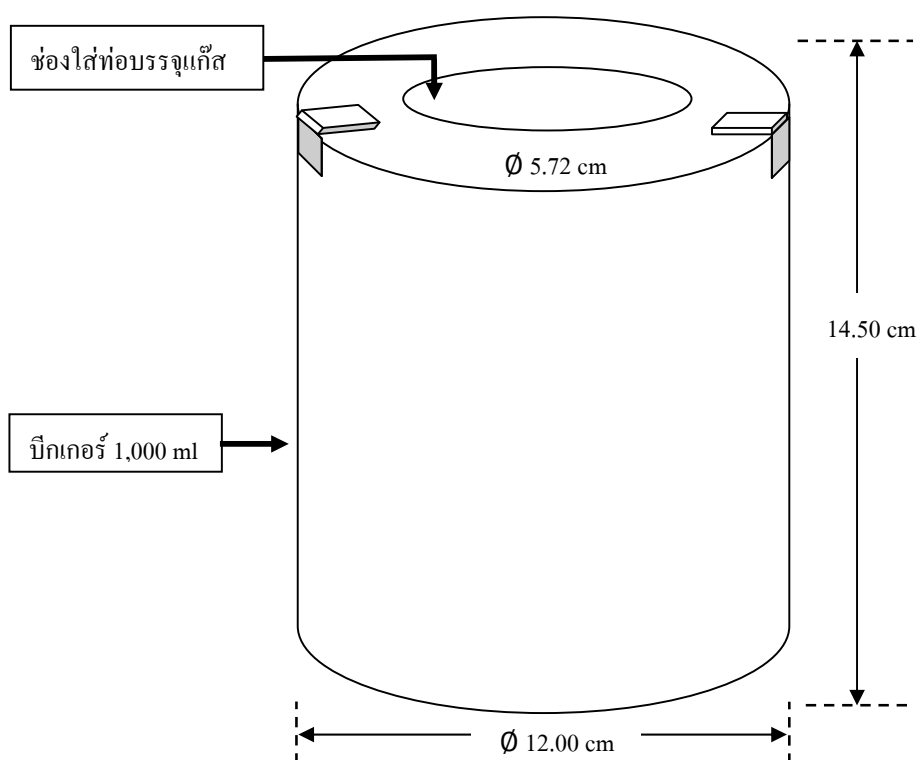
ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่สร้างขึ้นในงานวิจัย มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ชุดท่อบรรจุแก๊ส ชุดฐานให้ความร้อน และแผ่นยึดติดอุปกรณ์ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชุดท่อบรรจุแก๊ส ที่นำความร้อนทำจากสแตนเลส เกรด 304 มีความหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 เซนติเมตร มีความยาว 13.00 เซนติเมตร โดยปลายท่อทั้งสองข้างเชื่อมปิดสนิท ขอบฝาปิดด้านบนเชื่อมวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 เซนติเมตร เพื่อเป็นตัวยึดติดกับฐานให้ความร้อน และที่ฝาปิดด้านบนเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 เซนติเมตร เพื่อเชื่อมท่อสแตนเลสขนาด 0.64 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยท่อตรงยาว 5.00 เซนติเมตร และท่องอยาว 10.00 เซนติเมตร โดยเชื่อมน็อตเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.90 เซนติเมตร ความสูง 1.50 เซนติเมตร เพื่อเป็นช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ชุดท่อบรรจุแก๊ส

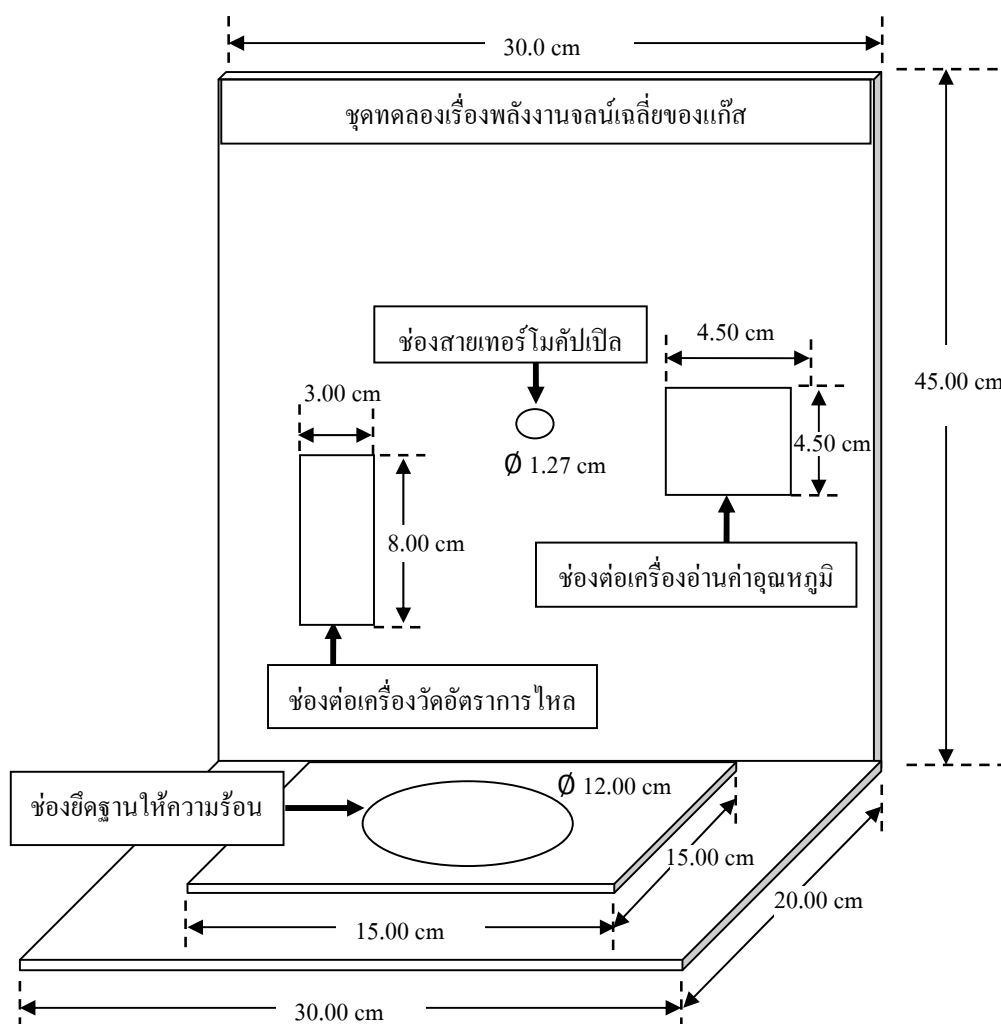
2. ชุดฐานให้ความร้อน ฐานให้ความร้อนประกอบด้วยบีกเกอร์ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ความสูง 14.50 เซนติเมตร ด้านบนมีฝาครอบสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.00 เซนติเมตร และเจาะรูบริเวณกลางแผ่นสเตนเลส 5.72 เซนติเมตร เพื่อเป็นช่องสำหรับใส่ท่อบรรจุแก๊ส ภายในบีกเกอร์บรรจุ น้ำ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ชุดฐานให้ความร้อน

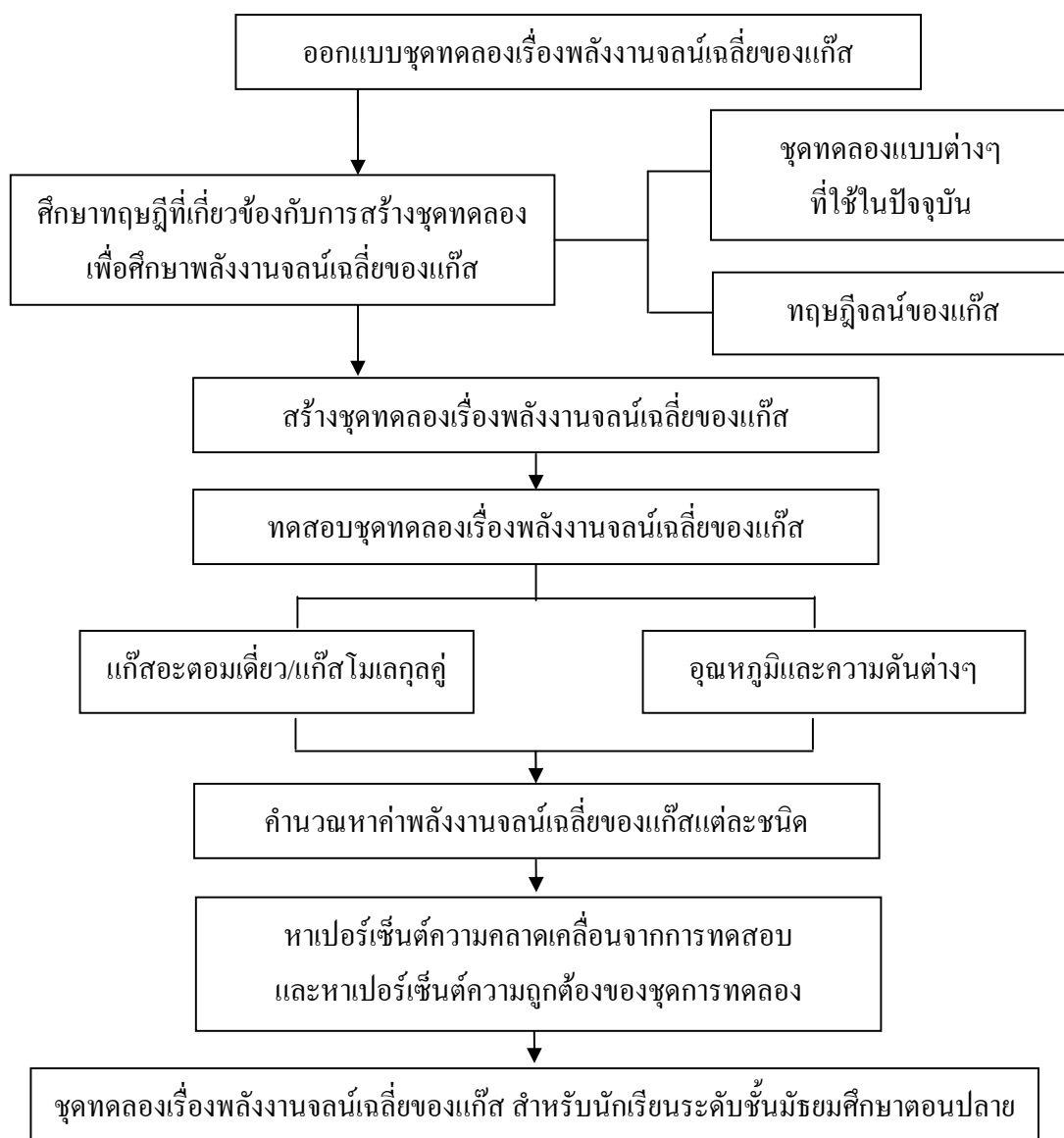
3. แผ่นยึดติดอุปกรณ์ แผ่นที่ใช้สำหรับยึดติดอุปกรณ์ทำจากแผ่นคูร่าบอร์ด์ ความหนา 4 มิลลิเมตร ซึ่งต่อตั้งจากกัน 2 แผ่น โดยแผ่นแนวราบมีขนาด 20×30 ตารางเซนติเมตร และแผ่นแนวตั้งมี

ขนาด 30×45 ตารางเซนติเมตร โดยแผ่นแนวราบติดแผ่นดิวร์บอร์ด ขนาด 15×15 ตารางเซนติเมตร ที่บริเวณตรงกลางเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.00 เซนติเมตร เพื่อยึดฐานให้ความร้อน และแผ่นแนวตั้งเจาะช่องสำหรับต่อเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ เครื่องวัดอัตราการไหล สายเทอร์โมคัปเปิล และช่องสายไฟ เครื่องให้ความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 แผ่นยึดติดอุปกรณ์

แผนผังแสดงการพัฒนาชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับ
ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย



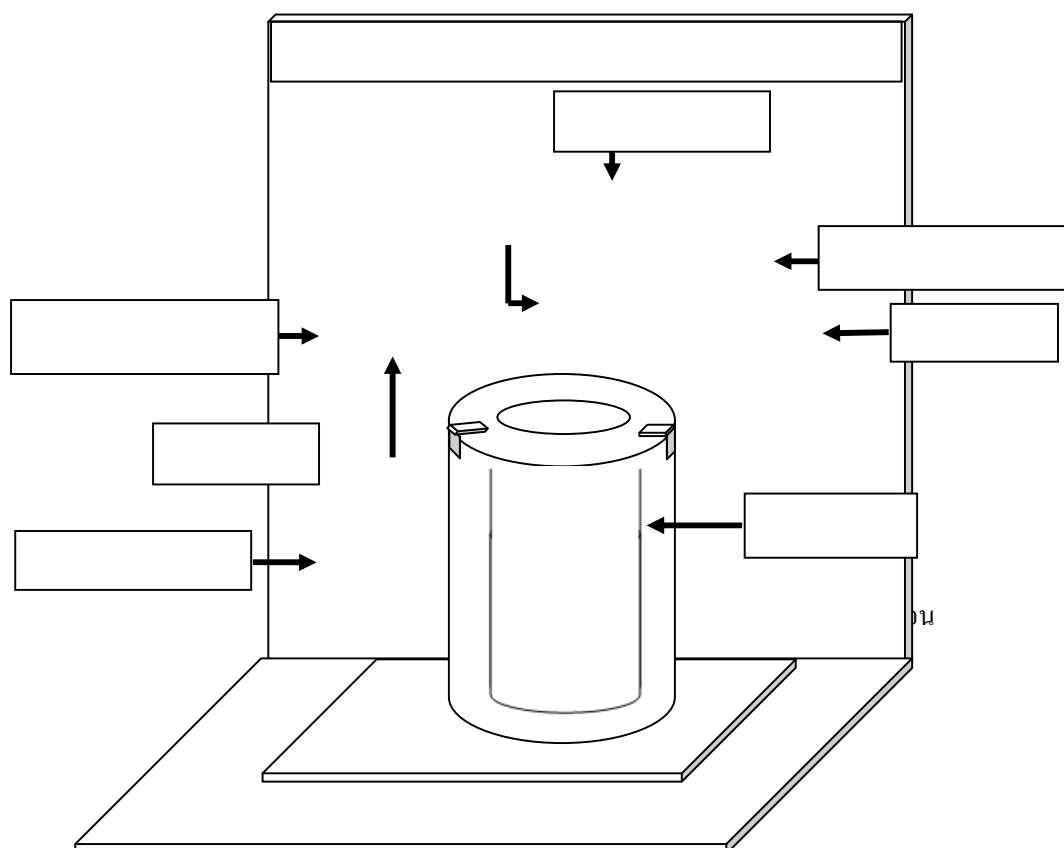
ภาพที่ 3-4 แผนผังต้นแบบชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส

ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำชุดการทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ที่ได้ออกแบบดังภาพที่ 3-5 และสร้างขึ้นมามีใช้ในการศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว (แก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม) และแก๊สโมเลกุลคู่ (แก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน) ที่อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน และเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังต่อไปนี้

อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

- | | |
|---|------------|
| 1. เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส | 1 เครื่อง |
| 2. เครื่องวัดความดันแก๊ส (Swagelok 316 BF3) | 1 เครื่อง |
| 3. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K | 1 เครื่อง |
| 4. เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (MAX WELL MTB48) | 1 เครื่อง |
| 5. เทอร์โมมิเตอร์ (HANNA instruments HI98501) | 1 เครื่อง |
| 6. บอลวาล์ว (Swagelok ss-42GS4) | 2 ตัว |
| 7. ปุ่มสูญญากาศ (AP-01P) | 1 เครื่อง |
| 8. เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate MS300HS) | 1 เครื่อง |
| 9. ท่อสแตนเลส (เกรด 304 หน้า 2 mm) | 1 เมตร |
| 10. ท่อต่อสามทาง (Swagelok 316 YNI) | 2 ตัว |
| 11. ท่อสแตนเลส 1/4 นิ้ว | 1 เมตร |
| 12. บีกเกอร์ 1,000 ml | 2 ใบ |
| 13. แผ่นคูร่าบอร์ค 4 mm | 1 แผ่น |
| 14. แก๊สอาร์กอน (industrial grade 99.99%) | 1 ถัง |
| 15. แก๊สฮีเลียม (industrial grade 99.995%) | 1 ถัง |
| 16. แก๊สไนโตรเจน (industrial grade 99.5%) | 1 ถัง |
| 17. แก๊สออกซิเจน (industrial grade 99.5%) | 1 ถัง |
| 18. น้ำแข็งป่น | 1 กิโลกรัม |



ภาพที่ 3-5 ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส

ดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองและเก็บผลข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

1.1 ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ออกแบบและสร้างขึ้นจากวัสดุอุปกรณ์ที่คงทนถาวร ซึ่งสามารถใช้ได้เมื่ออุณหภูมิสูง ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถทำความสะอาดได้ง่าย โดยชุดทดลองประกอบด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสม

1.2 แก๊สที่นำมาทดลองประกอบด้วยแก๊สอะตอมเดี่ยว ได้แก่ แก๊สอาร์กอนและแก๊สฮีเลียม แก๊สโมเลกุลคู่ ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน

1.3 น้ำและน้ำแข็งป่น เพื่อปรับอุณหภูมิในช่วงที่ต้องการทดลอง ซึ่งทำการลดอุณหภูมิโดยใช้น้ำแข็งป่น และเพิ่มอุณหภูมิโดยต้มน้ำด้วยเครื่องให้ความร้อน

1.4 ชุดเครื่องมือวัด ได้แก่ เครื่องวัดอัตราการไหล เครื่องวัดความดันแก๊ส เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ เทอร์โมมิเตอร์ และนาฬิกาจับเวลา

1.5 เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผล

2. ดำเนินการทดลอง ตามขั้นตอนดังนี้

2.1 ทดลองและเก็บข้อมูลจากชุดทดลองเพื่อหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่อุณหภูมิต่างกัน

2.1.1 ติดตั้งท่อแก๊สฮีเลียมเข้ากับท่อแก๊สเข้า และติดตั้งปั๊มสุญญากาศเข้ากับท่อแก๊สออกของชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส

2.1.2 ปิดวาล์วตัวที่ 1 พร้อมเปิดวาล์วตัวที่ 2 ทำการสูบอากาศภายในท่อบรรจุแก๊สออกจนเป็นสุญญากาศ และปิดวาล์วตัวที่ 2

2.1.3 เปิดวาล์วตัวที่ 1 ปล่อยให้แก๊สฮีเลียมเข้าไปภายในท่อบรรจุแก๊ส โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลควบคุมการไหลของแก๊สไม่ให้ไหลเร็วจนเกินไป พร้อมอ่านค่าเครื่องวัดความดัน เมื่อวัดค่าได้ 0.2 บาร์ (1.2132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งเป็นความดันเริ่มต้น (P_i) ปิดวาล์วตัวที่ 1 ขณะนั้นทำการอ่านค่าอุณหภูมิภายในท่อบรรจุแก๊ส และบันทึกไว้เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (T_i)

2.1.4 ทำการลดอุณหภูมิและเพิ่มอุณหภูมิภายในท่อบรรจุแก๊ส โดยการเติมน้ำที่ปรับอุณหภูมิอยู่ในช่วง 10 - 60 องศาเซลเซียส ลงในฐานให้ความร้อน ตามขั้นตอนดังนี้

2.1.4.1 นำน้ำแข็งป่นใส่ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำที่อุณหภูมิห้อง ปรับอุณหภูมิที่ 10, 20, 25 และ 30 องศาเซลเซียส เติมน้ำลงในฐานให้ความร้อน เพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สภายในท่อแก๊ส

2.1.4.2 นำน้ำเติมลงในบีกเกอร์ เปิดเครื่องให้ความร้อนปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เติมน้ำลงในฐานให้ความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิแก๊สภายในท่อแก๊ส

2.1.5 จากข้อ 2.1.4 เมื่อให้ความร้อนกับแก๊สภายในท่อแก๊สที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง (T_f) จับ

เวลา 5 นาที พร้อมอ่านค่าความดันแก๊สดังกล่าวจากเครื่องมือวัดความดัน (P_f) และบันทึกผลลงในตาราง

2.1.6 ทำการทดลองข้อ 2.1.1-2.1.5 กับแก๊สฮีเลียมซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง

2.1.7 ทำการทดลองข้อ 2.1.2-2.1.6 แต่เปลี่ยนค่าความดันเริ่มต้นของแก๊สฮีเลียมเป็น 0.3 บาร์ (1.3132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร) และ 0.4 บาร์ (1.4132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร)

2.1.8 ทำการทดลองข้อ 2.1.1-2.1.7 กับแก๊สอาร์กอน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ตามลำดับ พร้อมกับบันทึกผลลงในตาราง

2.1.9 นำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยที่อุณหภูมิ 10, 20, 25, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ดังนี้

2.1.9.1 แก๊สอะตอมเดี่ยว คำนวณค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากสมการ $\bar{E}_k = (3k_b P_f T_f) / 2P_f$ และบันทึกผลลงในตาราง

2.1.9.2 แก๊สโมเลกุลคู่ คำนวณค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากสมการ $\bar{E}_k = (5k_b P_f T_f) / 2P_f$ และบันทึกผลลงในตาราง

2.1.10 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันเริ่มต้นคงที่ต่างกัน

2.1.11 นำค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของชุดทดลอง

2.1.11.1 ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของแก๊สอะตอมเดี่ยวคำนวณจากสมการ $\bar{E}_k = (3k_b T_f) / 2$

2.1.11.2 ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของแก๊สโมเลกุลคู่คำนวณจากสมการ $\bar{E}_k = (5k_b T_f) / 2$

2.1.12 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

2.2 ทดลองและเก็บข้อมูลจากชุดทดลองเพื่อหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน ตามขั้นตอนดังนี้

2.2.1 ทำการติดตั้งท่อแก๊สและสูบลอากาศภายในท่อบรรจุแก๊สออกจนเป็นสุญญากาศ ดังข้อ 2.1.1-2.1.2 ตามลำดับ

2.2.2 ปล่อยแก๊สฮีเลียมเข้าไปภายในท่อบรรจุแก๊ส โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลควบคุมการไหลของแก๊ส เมื่ออ่านค่าความดันได้ 0.2 บาร์ (1.2132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งเป็นความดันเริ่มต้นของแก๊ส (P_i) ปิดวาล์ว และอ่านค่าอุณหภูมิภายในท่อบรรจุแก๊ส พร้อมบันทึกไว้เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (T_i)

2.2.3 ทำการลดอุณหภูมิแก๊สภายในท่อบรรจุแก๊สที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (T_f) จับเวลา 5 นาที อ่านค่าความดันแก๊สดังกล่าวจากเครื่องวัดความดัน (P_f) และบันทึกผลลงในตาราง

2.2.4 ทำการทดลองข้อ 2.2.1-2.2.3 กับแก๊สฮีเลียมซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง

2.2.5 ทำการทดลองข้อ 2.2.1-2.2.4 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิแก๊สภายในท่อบรรจุแก๊สที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเพิ่มอุณหภูมิแก๊สภายในท่อบรรจุแก๊สที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

2.2.6 ทำการทดลองข้อ 2.2.1-2.2.5 กับแก๊สฮีเลียม แต่เปลี่ยนความดันเริ่มต้นเป็น 0.3 บาร์ (1.3132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร) และ 0.4 บาร์ (1.4132×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร)

2.2.7 ทำการทดลองข้อ 2.2.1-2.2.6 กับแก๊สอาร์กอน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ตามลำดับ พร้อมบันทึกผลลงในตาราง

2.2.8 นำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ย ที่ความดันเริ่มต้นต่างกัน เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเท่ากับ 10, 25 และ 60 องศาเซลเซียส

2.2.9 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับความดันเริ่มต้นต่างๆ ที่อุณหภูมิกงที่ 10, 25 และ 60 องศาเซลเซียส

2.2.10 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

1. วิเคราะห์ผลการทดลองจากชุดทดลองเพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ดังนี้

1.1 หาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error)

$$\%Error = \frac{|X_t - X_m|}{X_t} \times 100\% \quad (3-1)$$

โดยที่ %Error คือค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
 X_t คือค่าที่ยอมรับได้
 X_m คือค่าจากการทดลอง

1.2 หาเปอร์เซ็นต์ค่าความถูกต้องของชุดทดลอง

$$\%Acc = 100\% - \%Error \quad (3-2)$$

2. นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้มาแปรผล และสรุปผลในขอบเขตของข้อมูลและวัตถุ ประสงค์การวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากผลการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งผลการวิจัยเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย

1. การออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส
2. การหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊ส โมเลกุลคู่
3. การเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊ส โมเลกุลคู่ กับค่าที่ได้

จากทฤษฎี

การออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส

ผลการออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายแสดงดังภาพที่ 4-1 โดยมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ (1) ท่อบรรจุแก๊ส แสดงดังภาพที่ 4-2 (2) ฐานให้ความร้อน แสดงดังภาพที่ 4-3 และ (3) แผ่นยึดติดอุปกรณ์ แสดงดังภาพที่ 4-4



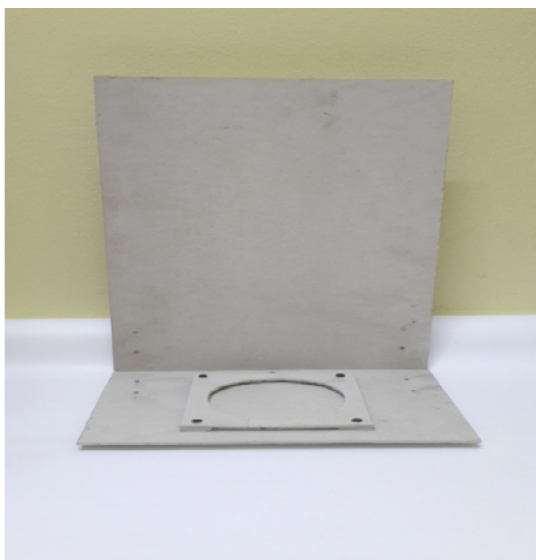
ภาพที่ 4-1 ชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย



ภาพที่ 4-2 ท่อบรรจุแก๊สและอุปกรณ์ประกอบประเภททาล้างและเกจวัดความดัน



ภาพที่ 4-3 ปีกเกอร์และฐานสำหรับให้ความร้อนกับท่อบรรจุแก๊ส



ภาพที่ 4-4 แผ่นยึดติดอุปกรณ์ชุดทดลอง

การหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่

การหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊สโมเลกุลคู่จากชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โดยหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส 4 ชนิดประกอบด้วยแก๊สอะตอมเดี่ยว ได้แก่ แก๊สฮีเลียม แก๊สอาร์กอน และแก๊สโมเลกุลคู่ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน ปรากฏผลดังนี้

1. การหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่อุณหภูมิต่างกัน

การทดลองนี้ปล่อยแก๊สทดสอบเข้าไปภายในท่อบรรจุแก๊ส ที่ค่าความดันเริ่มต้นคงที่ (P_i) $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ตามลำดับ มีค่าอุณหภูมิภายในท่อบรรจุแก๊สขณะนั้นเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น (T_i) ทำการลดอุณหภูมิและเพิ่มอุณหภูมิภายในท่อบรรจุแก๊ส (T_f) ให้มีอุณหภูมิเท่ากับ $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการวัดค่าความดันของแก๊สในขณะนั้น (P_f) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4-1, 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอุณหภูมิต่าง ๆ ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(K)	$\bar{E}_{k(av)}$ (eV)			
	ซีเลียม	อาร์กอน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
283.15	0.0381	0.0386	0.0643	0.0641
293.15	0.0385	0.0389	0.0649	0.0650
298.15	0.0389	0.0391	0.0657	0.0653
303.15	0.0393	0.0395	0.0662	0.0656
313.15	0.0399	0.0401	0.0669	0.0670
323.15	0.0405	0.0406	0.0677	0.0678
333.15	0.0412	0.0412	0.0689	0.0694

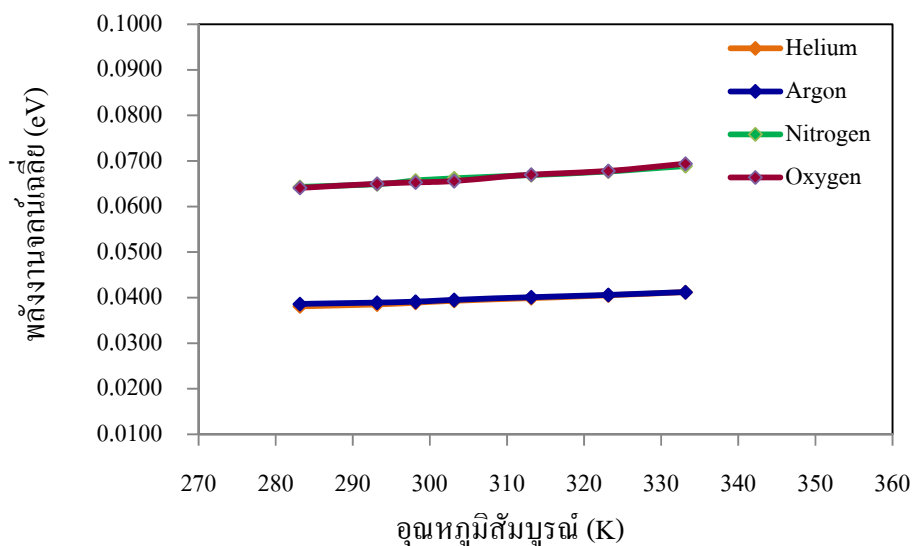
ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอุณหภูมิต่าง ๆ ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(K)	$\bar{E}_{k(av)}$ (eV)			
	ซีเลียม	อาร์กอน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
283.15	0.0379	0.0383	0.0625	0.0635
293.15	0.0383	0.0387	0.0637	0.0648
298.15	0.0389	0.0390	0.0652	0.0655
303.15	0.0390	0.0394	0.0658	0.0660
313.15	0.0395	0.0403	0.0666	0.0671
323.15	0.0401	0.0415	0.0675	0.0688
333.15	0.0407	0.0420	0.0693	0.0700

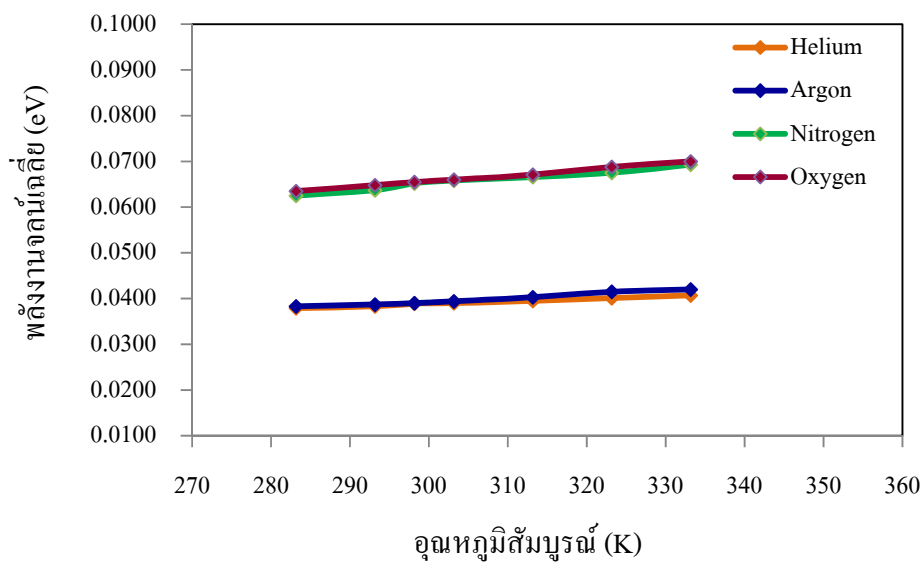
ตารางที่ 4-3 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอุณหภูมิต่าง ๆ ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(K)	$\bar{E}_{k(av)}$ (eV)			
	ฮีเลียม	อาร์กอน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
283.15	0.0378	0.0375	0.0627	0.0634
293.15	0.0382	0.0383	0.0641	0.0647
298.15	0.0386	0.0388	0.0649	0.0657
303.15	0.0397	0.0396	0.0656	0.0661
313.15	0.0400	0.0401	0.0666	0.0676
323.15	0.0406	0.0409	0.0675	0.0689
333.15	0.0411	0.0414	0.0688	0.0699

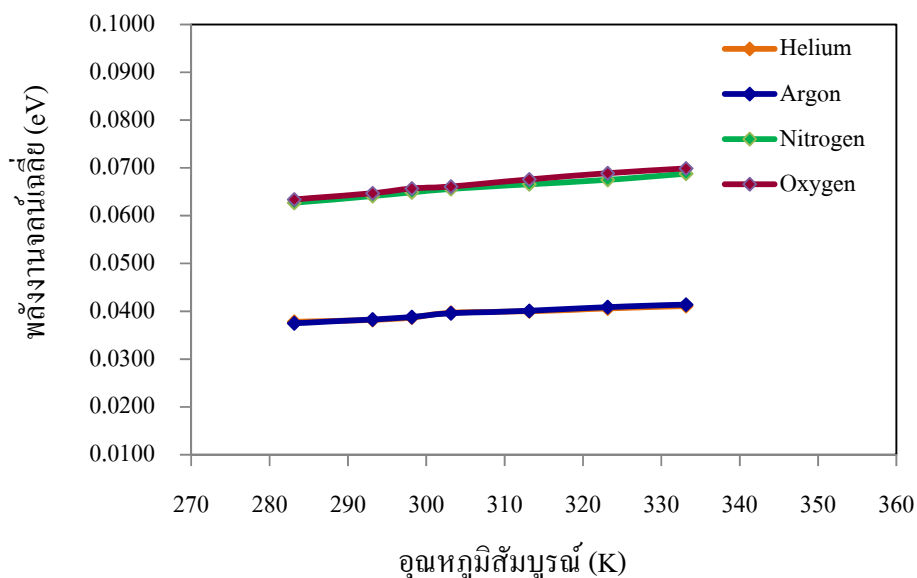
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ($\bar{E}_{k(av)}$) กับอุณหภูมิ (T_f) ที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สคงที่ $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ได้ดังภาพที่ 4-5, 4-6 และ 4-7 ซึ่งพบว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ และในขณะที่อุณหภูมิลดลงหรือเพิ่มขึ้นเท่ากัน พลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สโมเลกุลคู่มีค่ามากกว่าแก๊สอะตอมเดี่ยว โดยพลังงานจลน์เฉลี่ยแก๊สอะตอมเดี่ยวที่อุณหภูมิต่าง ๆ คำนวณได้จากสมการ $\bar{E}_k = (3k_b P_f T_f) / 2P_i$ ดังนั้นแก๊สฮีเลียมมีค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.0378 - 0.0411 eV และแก๊สอาร์กอนมีค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.0375 - 0.0420 eV พลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สโมเลกุลคู่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ $\bar{E}_k = (5k_b P_f T_f) / 2P_i$ จากผลการคำนวณที่ได้สำหรับแก๊สไนโตรเจนมีค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.0625 - 0.0693 eV และแก๊สออกซิเจนมีค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.0634 - 0.0700 eV



ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ต่าง ๆ ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$



ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ต่าง ๆ ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$



ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ต่าง ๆ ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สโมเลกุลคู่ ($E_{k(av)}$) ที่อุณหภูมิต่างกัน ที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สเท่ากับ $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ พบว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ โดยพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สโมเลกุลคู่จะมีค่ามากกว่าแก๊สอะตอมเดี่ยว

2. การหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว และแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน

การทดลองนี้ปล่อยแก๊สทดสอบเข้าไปภายในท่อบรรจุแก๊ส ที่ค่าความดันเริ่มต้น (P_i) เท่ากับ 1.2132×10^5 , 1.3132×10^5 และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ อ่านค่าอุณหภูมิภายในท่อบรรจุแก๊สขณะนั้นเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น (T_i) ทำการลดอุณหภูมิภายในท่อบรรจุแก๊ส (T_f) ให้มีอุณหภูมิเท่ากับ $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ พร้อมทั้งทำการวัดค่าความดันของแก๊สในขณะนั้น (P_f) ได้ผลการทดลองดังตารางที่

4-4, 4-5 และ 4-6 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ($\bar{E}_{k(av)}$) ที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4-4 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ความดันต่าง ๆ อุณหภูมิคงที่ 10 °C

P_i (10^5 N/m ²)	$\bar{E}_{k(av)}$ (eV)			
	ฮีเลียม	อาร์กอน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
1.2132	0.0381	0.0386	0.0643	0.0641
1.3132	0.0379	0.0383	0.0625	0.0635
1.4132	0.0378	0.0375	0.0627	0.0634

จากตารางที่ 4-4 ผลต่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวที่ความดัน 1.2132×10^5 , 1.3132×10^5 และ 1.4132×10^5 N/m² เมื่ออุณหภูมิคงที่ 10 °C มีค่าเท่ากับ 0.0005 eV, 0.0004 eV และ 0.0003 eV ตามลำดับ สำหรับแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าเท่ากับ 0.0002 eV, 0.0010 eV และ 0.0007 eV ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ความดันต่าง ๆ อุณหภูมิคงที่ 25 °C

P_i (10^5 N/m ²)	$\bar{E}_{k(av)}$ (eV)			
	ฮีเลียม	อาร์กอน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
1.2132	0.0389	0.0391	0.0657	0.0653
1.3132	0.0389	0.0390	0.0652	0.0655
1.4132	0.0387	0.0388	0.0649	0.0657

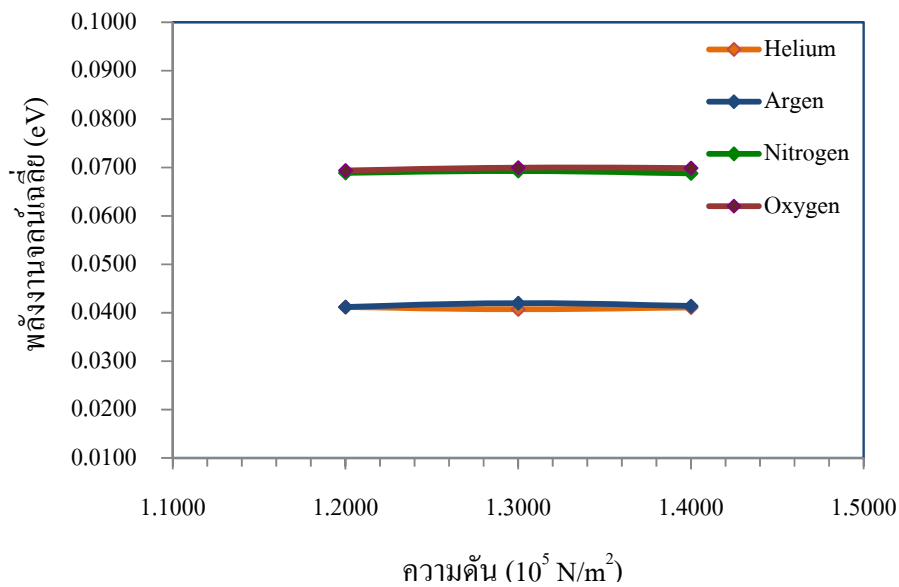
จากตารางที่ 4-5 ผลต่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวที่ความดัน 1.2132×10^5 , 1.3132×10^5 และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ เมื่ออุณหภูมิคงที่ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ผลต่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวมีค่าเท่ากับ 0.0002 eV , 0.0001 eV และ 0.0001 eV ตามลำดับ สำหรับแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าเท่ากับ 0.0004 eV , 0.0003 eV และ 0.0008 eV ตามลำดับ

ตารางที่ 4-6 ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ความดันต่าง ๆ อุณหภูมิคงที่ $60 \text{ }^\circ\text{C}$

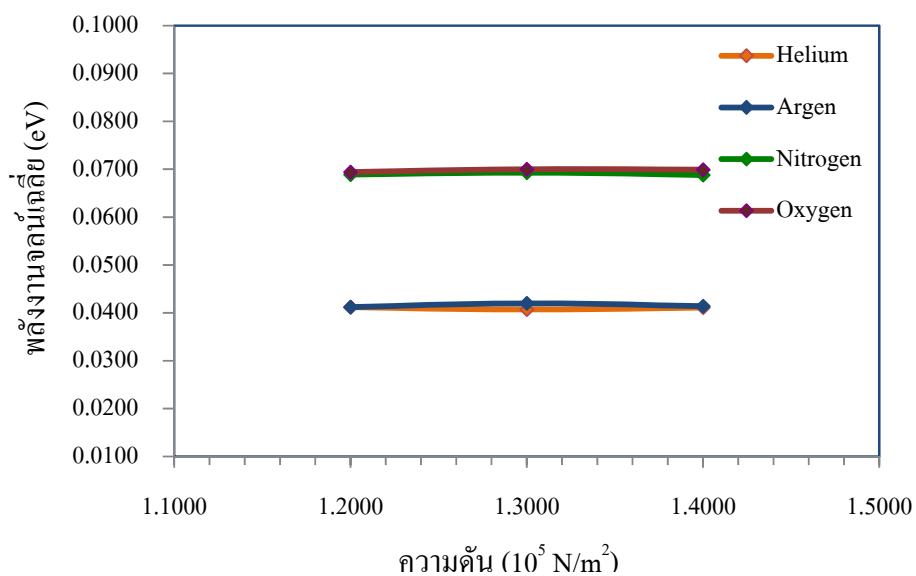
$P_i (10^5 \text{ N/m}^2)$	$\bar{E}_{k(av)} (\text{eV})$			
	ฮีเลียม	อาร์กอน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
1.2132	0.0412	0.0412	0.0689	0.0694
1.3132	0.0407	0.0420	0.0693	0.0700
1.4132	0.0411	0.0414	0.0688	0.0699

จากตารางที่ 4-6 ผลต่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวที่ความดัน 1.2132×10^5 , 1.3132×10^5 และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ เมื่ออุณหภูมิคงที่ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ผลต่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวมีค่าเท่ากับ 0.0000 eV , 0.0013 eV และ 0.0003 eV ตามลำดับ สำหรับแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าเท่ากับ 0.0005 eV , 0.0007 eV และ 0.00011 eV ตามลำดับ

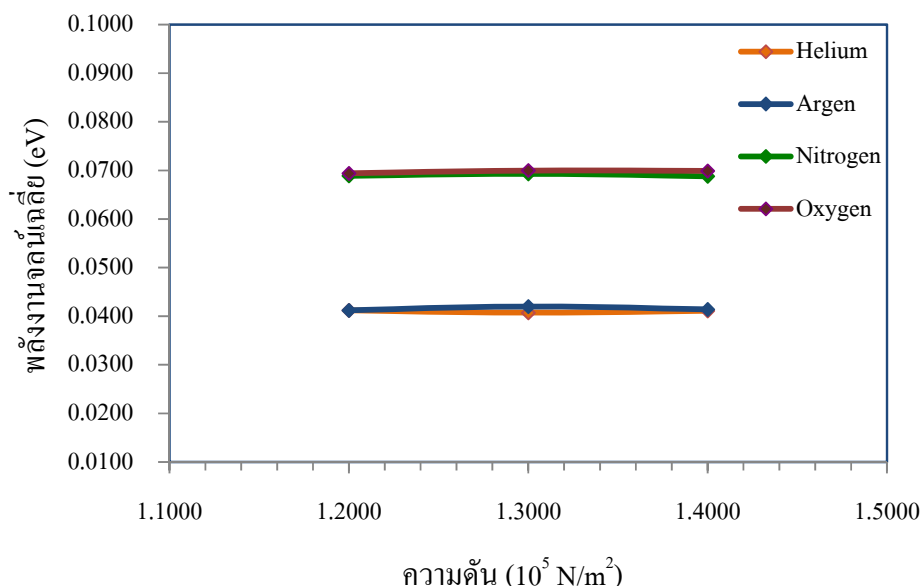
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ($\bar{E}_{k(av)}$) กับความดันเริ่มต้นของแก๊ส (P_i) ที่อุณหภูมิคงที่ $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ จะได้ดังภาพที่ 4-8, 4-9 และ 4-10 พบว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลจะมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลเฉลี่ยของแก๊สฮีเลียม แก๊สอาร์กอน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิ $10 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่าเท่ากับ 0.0379 eV , 0.0381 eV , 0.0632 eV และ 0.0637 eV ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่าเท่ากับ 0.0388 eV , 0.0389 eV , 0.0653 eV และ 0.0655 eV ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ $60 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่าเท่ากับ 0.0410 eV , 0.0415 eV , 0.0690 eV และ 0.0698 eV ตามลำดับ



ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับความดัน ที่อุณหภูมิ 10 °C



ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับความดัน ที่อุณหภูมิ 25 °C



ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สกับความดัน ที่อุณหภูมิ 60 °C

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน โดยอุณหภูมิกงที่ 10 °C, 25 °C และ 60 °C ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลมีค่าใกล้เคียงกัน

3. การเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ กับค่าที่ได้จากทฤษฎี

การนำค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดันเริ่มต้นคงที่ $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนและค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของชุดทดลอง ผลการทดลองของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดันเริ่มต้นคงที่ต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 4-7, 4-8 และ 4.9 ตามลำดับ และผลการทดลองของแก๊สโมเลกุลคู่ เป็นดังตารางที่ 4-10, 4-11 และ 4-12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(K)	$\bar{E}_k(\text{SD})(\text{eV})$	$\bar{E}_{k(\text{av})} (\text{eV})$		% error		% Acc	
		ซีเลียม	อาร์กอน	ซีเลียม	อาร์กอน	ซีเลียม	อาร์กอน
283.15	0.0366	0.0381	0.0386	4.10	5.46	95.90	94.54
293.15	0.0379	0.0385	0.0389	1.58	2.64	98.42	97.36
298.15	0.0386	0.0389	0.0391	0.78	1.30	99.22	98.70
303.15	0.0392	0.0393	0.0395	0.26	0.77	99.74	99.23
313.15	0.0405	0.0399	0.0401	1.48	0.99	98.52	99.01
323.15	0.0418	0.0405	0.0406	3.11	2.87	96.89	97.13
333.15	0.0431	0.0412	0.0412	4.41	4.41	95.59	95.59

ตารางที่ 4-8 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(K)	$\bar{E}_k(\text{SD})(\text{eV})$	$\bar{E}_{k(\text{av})} (\text{eV})$		% error		% Acc	
		ซีเลียม	อาร์กอน	ซีเลียม	อาร์กอน	ซีเลียม	อาร์กอน
283.15	0.0366	0.0379	0.0383	3.55	4.64	96.45	95.36
293.15	0.0379	0.0383	0.0387	1.06	2.11	92.08	98.94
298.15	0.0386	0.0389	0.0390	0.78	1.04	96.37	99.22
303.15	0.0392	0.0390	0.0394	0.51	0.51	96.45	99.49
313.15	0.0405	0.0395	0.0403	2.47	0.49	97.53	99.51
323.15	0.0418	0.0401	0.0415	4.07	0.72	95.93	99.28
333.15	0.0431	0.0407	0.0420	5.57	2.55	94.43	97.45

ตารางที่ 4-9 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(K)	$\bar{E}_k(\text{SD})(\text{eV})$	$\bar{E}_{k(\text{av})} (\text{eV})$		% error		% Acc	
		ซีเลียม	อาร์กอน	ซีเลียม	อาร์กอน	ซีเลียม	อาร์กอน
283.15	0.0366	0.0378	0.0375	3.28	2.46	96.72	97.54
293.15	0.0379	0.0382	0.0383	0.79	1.06	99.21	98.94
298.15	0.0386	0.0387	0.0388	0.26	0.52	99.74	99.48
303.15	0.0392	0.0397	0.0396	1.28	1.02	98.72	98.98
313.15	0.0405	0.0400	0.0401	1.23	0.99	98.77	99.01
323.15	0.0418	0.0406	0.0409	2.87	2.15	97.13	97.85
333.15	0.0431	0.0411	0.0414	4.64	3.94	95.36	96.06

ตารางที่ 4-10 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(K)	$\bar{E}_k(\text{SD})(\text{eV})$	$\bar{E}_{k(\text{av})} (\text{eV})$		% error		% Acc	
		ไนโตรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
283.15	0.0611	0.0643	0.0641	5.24	4.91	94.76	95.09
293.15	0.0632	0.0649	0.0650	2.69	2.85	97.31	97.15
298.15	0.0643	0.0657	0.0653	2.18	1.56	97.82	98.44
303.15	0.0654	0.0662	0.0656	1.22	0.31	98.78	99.69
313.15	0.0675	0.0669	0.0670	0.89	0.74	99.11	99.26
323.15	0.0697	0.0677	0.0678	2.87	2.73	97.13	97.27
333.15	0.0718	0.0689	0.0694	4.04	3.34	95.96	96.66

ตารางที่ 4-11 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

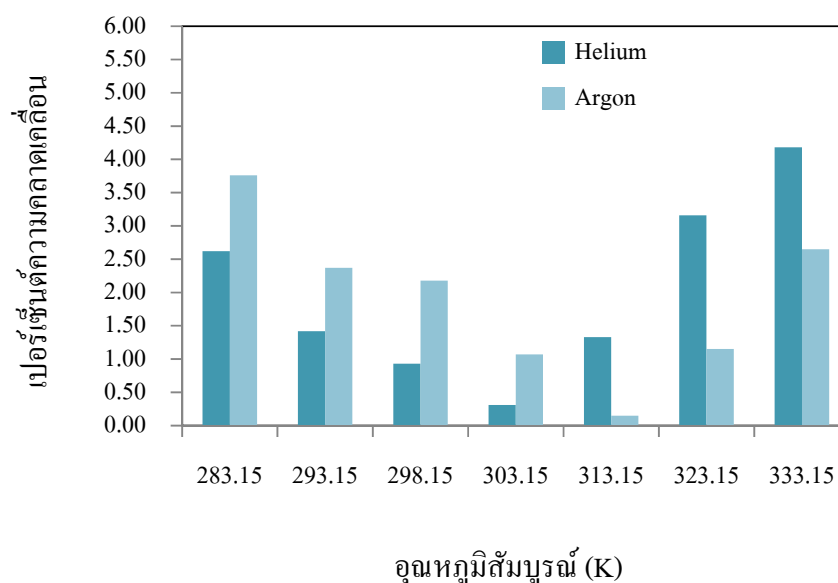
T(K)	$\bar{E}_k(\text{SD})(\text{eV})$	$\bar{E}_{k(\text{av})} (\text{eV})$		% error		% Acc	
		ไนโตรเจน ออกซิเจน	ไนโตรเจน ออกซิเจน	ไนโตรเจน ออกซิเจน	ไนโตรเจน ออกซิเจน		
283.15	0.0611	0.0625	0.0635	2.29	3.93	97.71	96.07
293.15	0.0632	0.0637	0.0648	0.79	2.53	99.21	97.47
298.15	0.0643	0.0652	0.0655	1.40	1.87	98.60	98.13
303.15	0.0654	0.0658	0.0660	0.61	0.92	99.39	99.08
313.15	0.0675	0.0666	0.0671	1.33	0.59	98.67	99.41
323.15	0.0697	0.0675	0.0688	3.16	1.29	96.84	98.71
333.15	0.0718	0.0693	0.0700	3.48	2.51	96.52	97.49

ตารางที่ 4-12 ผลการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

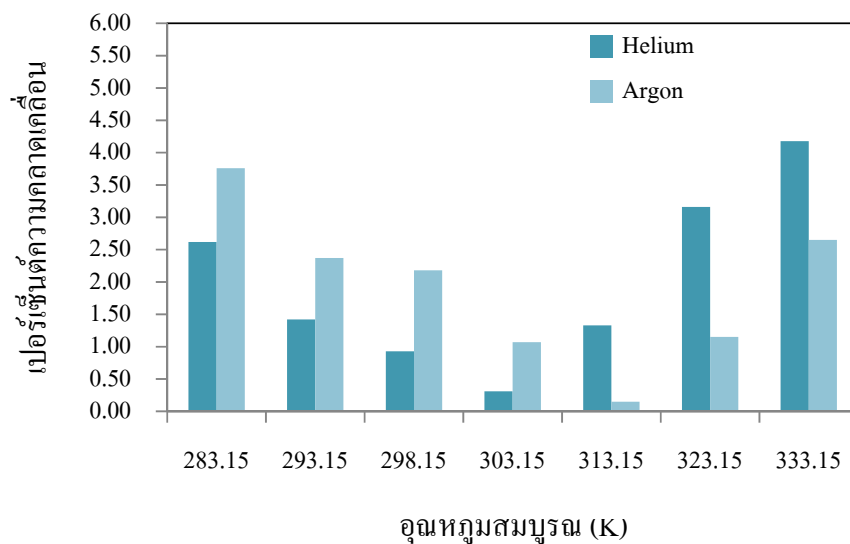
T(K)	$\bar{E}_k(\text{SD})(\text{eV})$	$\bar{E}_{k(\text{av})} (\text{eV})$		% error		% Acc	
		ไนโตรเจน ออกซิเจน	ไนโตรเจน ออกซิเจน	ไนโตรเจน ออกซิเจน	ไนโตรเจน ออกซิเจน		
283.15	0.0611	0.0627	0.0634	2.62	3.76	97.38	96.24
293.15	0.0632	0.0641	0.0647	1.42	2.37	98.58	97.63
298.15	0.0643	0.0649	0.0657	0.93	2.18	99.07	97.82
303.15	0.0654	0.0656	0.0661	0.31	1.07	99.69	98.93
313.15	0.0675	0.0666	0.0676	1.33	0.15	98.67	99.85
323.15	0.0697	0.0675	0.0689	3.16	1.15	96.84	98.85
333.15	0.0718	0.0688	0.0699	4.18	2.65	95.82	97.35

ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว แก๊สโมเลกุลคู่ กับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของแก๊สอะตอมเดี่ยว ($\bar{E}_k(SD)$) คำนวณจากสมการ $\bar{E}_k = (3k_b T_f)/2$ และค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของแก๊สโมเลกุลคู่ ($\bar{E}_k(SD)$) คำนวณจากสมการ $\bar{E}_k = (5k_b T_f)/2$ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น โดยแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 5% และค่าความถูกต้องของชุดทดลองประมาณ 95%

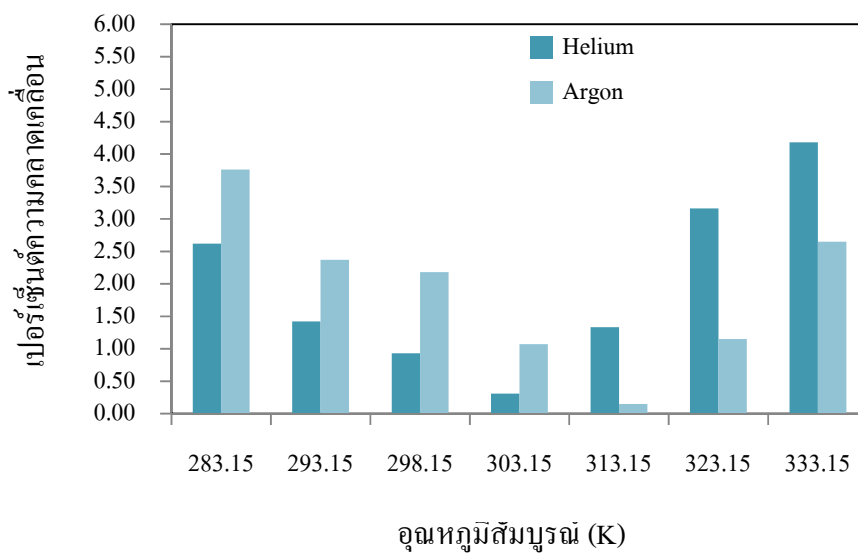
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่ความดันเริ่มต้นคงที่ $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ และ $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ จากผลการทดลองของแก๊สอะตอมเดี่ยวได้ดังภาพที่ 4-11, 4-12 และ 4-13 และแก๊สโมเลกุลคู่ได้ดังภาพที่ 4-14, 4-15 และ 4-16



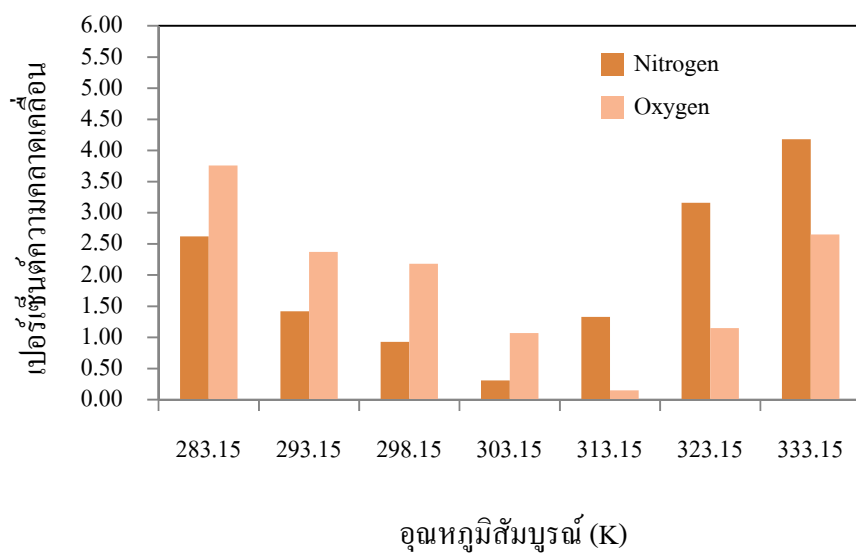
ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$



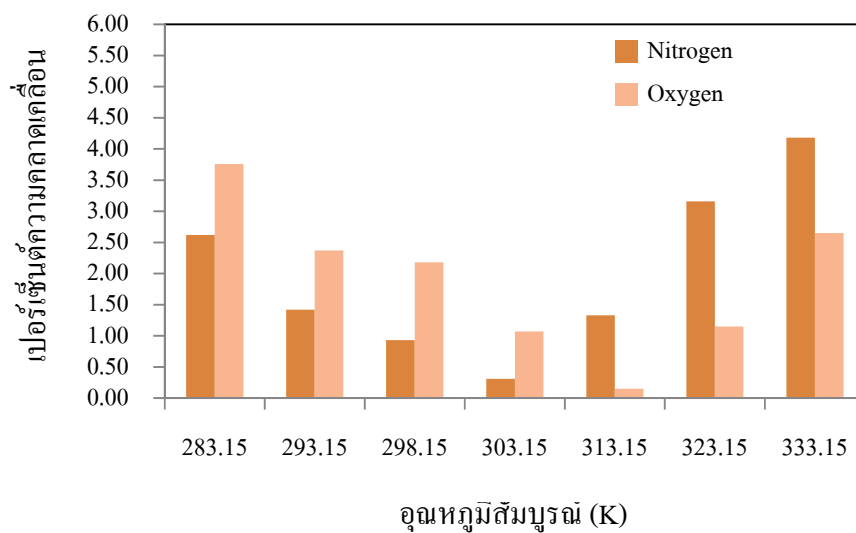
ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$



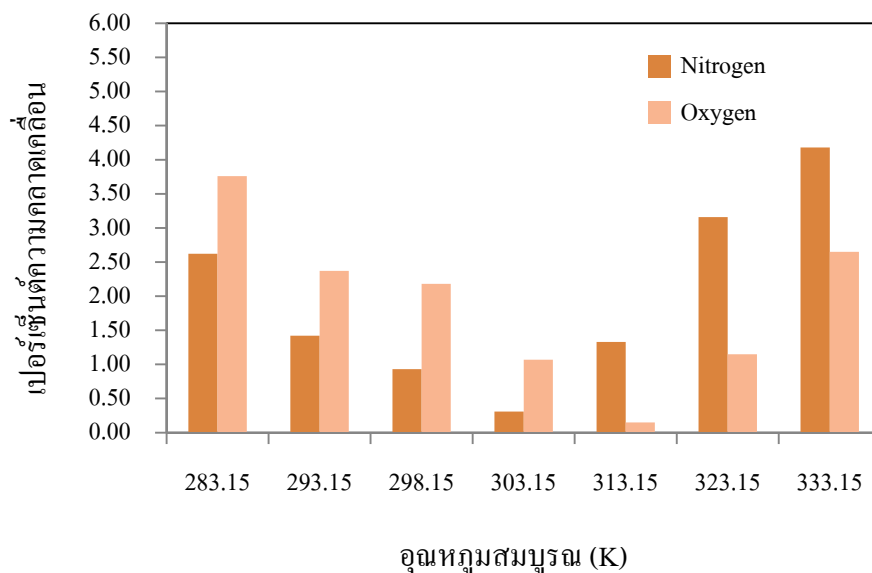
ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$



ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สโมเลกุลคู่
ที่ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$



ภาพที่ 4-15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สโมเลกุลคู่
ที่ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$



ภาพที่ 4-16 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊สโมเลกุลคู่
ที่ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

พิจารณาที่อุณหภูมิห้อง $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแก๊สอะตอมเดี่ยวอยู่ในช่วงประมาณ 1% และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแก๊สโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 2% เมื่ออุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ ค่าความคลาดเคลื่อนจะมากขึ้น โดยแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 5% และค่าความถูกต้องของชุดทดลองประมาณ 95%

บทที่ 5

สรุปผลและอภิปรายผล

วิจัยครั้งนี้ได้พัฒนาโดยการออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ซึ่งชุดทดลองสร้างจากอุปกรณ์ที่คงทนถาวร และประกอบด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสมได้มาตรฐาน สามารถใช้งานได้ตรงตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส เพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ และทำการทดสอบหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี พร้อมหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน และเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของชุดทดลอง โดยมีรายละเอียดการสรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะต่างๆ ดังนี้

สรุปผล

การออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ซึ่งชุดทดลองนี้อาศัยหลักการแบบจำลองโมเลกุลของแก๊สอุดมคติและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส โดยทำการทดลองกับแก๊สอะตอมเดี่ยว ได้แก่ แก๊สฮีเลียม และแก๊สอาร์กอน แก๊สโมเลกุลคู่ ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจน ผลการวิจัยหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่ค่าความดันเริ่มต้นสูงกว่าความดันบรรยากาศ 3 ค่า และอุณหภูมิในช่วง $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ และที่อุณหภูมิเดียวกันพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สโมเลกุลคู่มีค่ามากกว่าแก๊สอะตอมเดี่ยว จากผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่อุณหภูมิต่างกันเท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความดันต่าง ๆ พบว่าการเพิ่มความดันเริ่มต้นในแก๊สชนิดเดียวกันค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน และพลังงานจลน์เฉลี่ยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากทฤษฎี พบว่าที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงกว่า

อุณหภูมิห้องมาก ๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น โดยแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 5% และค่าความถูกต้องของชุดทดลองประมาณ 95%

อภิปรายผล

1. จากการออกแบบและสร้างชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย เพื่อศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สต่างชนิดกัน โดยทำการทดลองกับแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ชุดทดลองนี้สร้างโดยอาศัยหลักการแบบจำลองโมเลกุลของแก๊สอุดมคติ และทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ซึ่งโมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมาก การที่จะวัดความเร็วว่าแต่ละโมเลกุลของแก๊สวิ่งเร็วเท่าใดหรือชนกับโมเลกุลอื่นกี่ครั้งนั้นสามารถทำได้ยาก แต่มีทางคาดคะเนได้ว่าแก๊สจำนวนนั้นจะแสดงผลอย่างไร โดยการคำนวณจากความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรของแก๊ส จึงเรียกทฤษฎีที่ใช้การคำนวณดังกล่าวว่าทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ความดันของแก๊สที่วัดได้นั้นเกิดขึ้นจากโมเลกุลของแก๊สวิ่งเข้าชนภาชนะ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นพลังงานความร้อนจะถ่ายเทไปสู่โมเลกุลของแก๊สทำให้โมเลกุลแก๊สมีความเร็วมากขึ้นและชนภาชนะแรงขึ้นซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความดันในภาชนะนั้น ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความดันของแก๊สก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ, 2541, หน้า 127) ซึ่งผลการทดลองยืนยันได้ว่าค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ที่อุณหภูมิต่างกันพลังงานจลน์เฉลี่ยแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับชุดทดลองเพื่อศึกษาสมบัติและทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (พรวิศิ มโนพญา, 2545) และชุดสาธิตทางฟิสิกส์เรื่องทฤษฎีจลน์ของแก๊ส สำหรับการสอนวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 (สมชาย เกียรติกมลชัย, 2548) และที่อุณหภูมิและความดันเดียวกันแก๊สโมเลกุลคู่มีพลังงานจลน์เฉลี่ยสูงกว่าแก๊สอะตอมเดี่ยว เมื่อพิจารณาผลการทดลองของแก๊สอะตอมเดี่ยวระหว่างแก๊สฮีเลียมกับแก๊สอาร์กอน พบว่าที่เงื่อนไขเดียวกันพลังงานจลน์เฉลี่ยมีค่าไม่แตกต่างกัน สำหรับผลการทดลองของแก๊สโมเลกุลคู่ระหว่างแก๊สไนโตรเจนกับแก๊สออกซิเจนก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องตามหลักทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ดังนั้นชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ในการศึกษาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สต่างชนิดกันทั้งแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ ได้ และสามารถ

นำไปใช้ประกอบการจัดการเรียนการสอนเรื่องทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. จากผลการวิจัยที่ทำการหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ที่อุณหภูมิต่างกัน โดยมีค่าความดันเริ่มต้นคงที่ และมีค่าอุณหภูมิภายในที่บรรจุแก๊สขณะนั้นเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น เมื่อทำการลดอุณหภูมิและเพิ่มอุณหภูมิภายในที่บรรจุแก๊ส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต้องการวัดค่าความดันของแก๊สในขณะนั้น ผลการทดลองพบว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ซึ่งเป็นไปตามหลักการทฤษฎีจลน์ของแก๊ส จากทฤษฎีบทการแบ่งเท่าของพลังงานครอบคลุมทั้งกรณีแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ในกรณีที่แก๊สมีพฤติกรรมเป็นแบบแก๊สอุดมคติซึ่งมีใจความว่าแต่ละระดับของความอิสระมีผลทำให้เกิดพลังงานของในระบบมีค่าเท่ากับ $(k_b T)/2$ โดยระดับของความอิสระที่มีความเป็นไปได้ต้องมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ การหมุน และการสั่นของโมเลกุล สำหรับแก๊สอะตอมเดี่ยวยังมีระดับขึ้นความเสรีเท่ากับ 3 จึงมีค่าพลังงานกลเฉลี่ยเท่ากับค่าพลังงานจลน์การเคลื่อนที่เฉลี่ย (\bar{E}_k) กล่าวคือ $\bar{E} = \bar{E}_k = (3k_b T)/2$ จึงคำนวณค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวจาก $\bar{E}_k = (3k_b P_f T_f)/2P_f$ สำหรับแก๊สโมเลกุลคู่ นอกจากระดับขึ้นความเสรีที่เท่ากับ 3 เนื่องจากการเคลื่อนที่ศูนย์กลางมวล ตามแนวแกนทั้งสามของระบบพิกัดฉากเช่นเดียวกับผลของแก๊สอะตอมเดี่ยวแล้ว แก๊สโมเลกุลคู่ยังสามารถหมุนรอบแกน 2 แกนที่ตั้งฉากกัน ซึ่งผ่านศูนย์กลางมวลและตั้งฉากกับแนวเชื่อมต่อของอะตอมทั้งสองด้วย จึงทำให้เกิดพลังงานจลน์การหมุน โดยมีผลต่อระดับขึ้นความเสรีเพิ่มขึ้นอีก 2 ตามลักษณะดังกล่าวนี้แก๊สโมเลกุลคู่ซึ่งมีอุณหภูมิ T เคลวิน จะมีพลังงานกลเฉลี่ย (\bar{E}) เท่ากับ $(5k_b T)/2$ จึงคำนวณค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สโมเลกุลคู่จากสมการ $\bar{E}_k = (5k_b P_f T_f)/2P_f$

จากสมการสังเกตได้ว่าเมื่อนำค่าความดันที่วัดได้ (P_f) ที่อุณหภูมิ (T_f) ต่างๆ มาคำนวณหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส พบว่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ และที่อุณหภูมิเดียวกันพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลของแก๊สโมเลกุลคู่จะมีค่ามากกว่าแก๊สอะตอมเดี่ยว

3. จากผลการวิจัยที่ทำการหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สประเภทอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ที่อุณหภูมิคงที่และความดันเริ่มต้นของแก๊สต่างกัน ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยต่อโมเลกุลมีค่า

ใกล้เคียงกันในกลุ่มแก๊สประเภทเดียวกัน จากสมการ (2-15) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ของโมเลกุลกับความดัน เมื่อปริมาตรคงที่ค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สมีค่าแปรผันตรงกับความดันและแปรผกผันกับจำนวนโมเลกุล ($\bar{E}_k \propto (P/N)$) ในกรณีการทดลองเมื่อปล่อยแก๊สฮีเลียมและแก๊สอาร์กอนซึ่งเป็นแก๊สอะตอมเดี่ยวเข้าไปภายในท่อบรรจุแก๊สที่ความดันเริ่มต้นของแก๊สเท่ากัน จำนวนโมเลกุลของแก๊สมีค่าเท่ากัน ดังนั้นถ้าระบบไม่มีการรั่วไหลของแก๊สเกิดขึ้นค่าอัตราส่วนของความดันและจำนวนโมเลกุลของแก๊สมีค่าเท่ากัน ซึ่งเกิดขึ้นได้ทำนองเดียวกันในกลุ่มแก๊สโมเลกุลคู่ของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจน ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าชนิดของแก๊สไม่มีผลต่อค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส

สำหรับการเพิ่มความดันเริ่มต้นในแก๊สชนิดเดียวกันค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเพิ่มความดันก็เป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุล จึงมีผลทำให้อัตราส่วนของความดันและจำนวนโมเลกุลมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

4. จากผลการวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากทฤษฎี พบว่าที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องมากๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น โดยแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 5% และค่าความถูกต้องของชุดทดลองประมาณ 95% โดยชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นนี้ทำให้นักเรียนสามารถเรียนรู้วิธีการทดลอง การติดตั้งเครื่องมือ การใช้เครื่องมืออย่างถูกวิธี การอ่านค่าจากเครื่องมือวัด และการเก็บบำรุงรักษาเครื่องมือและอุปกรณ์ ชุดทดลองนี้จึงสามารถแยกชิ้นส่วนต่างๆ ได้ ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งต้องติดตั้งเครื่องมือวัด และส่วนประกอบต่าง ๆ เข้ากับส่วนของท่อบรรจุแก๊ส และปล่อยแก๊สเข้าไปเพื่อตรวจสอบระบบว่ามีการรั่วไหลออกแก๊สหรือไม่ โดยการจับเวลาและสังเกตค่าความดัน ถ้ามีการรั่วของแก๊สเกิดขึ้นแสดงว่าบรรจุแก๊สที่ความดันทดสอบได้ในระยะเวลาสั้นๆ ดังนั้นการทำการทดลองในขณะที่ยังมีการรั่วไหลของแก๊สมากจะทำให้ภายในท่อบรรจุแก๊สมีแก๊สอื่นๆ รวมอยู่ด้วย มีผลทำให้แก๊สที่ต้องการศึกษาเกิดความคลาดเคลื่อน และความคลาดเคลื่อนยังเกิดจากระยะเวลาที่ใช้ในการลดและเพิ่มอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่าอุณหภูมิห้องมาก ๆ จะทำให้แก๊สภายในท่อบรรจุแก๊สมีโอกาสรั่วไหลขึ้นได้ นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนของค่า

พลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น จากกระบวนการทดลอง ความแม่นยำของชุดทดลอง เครื่องมือวัด

ข้อเสนอแนะ

1. ชุดทดลองสามารถแยกส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ ดังนั้นควรมีการเก็บรักษาอุปกรณ์ และเครื่องมือวัดต่าง ๆ ให้เหมาะสม และตรวจสอบประสิทธิภาพก่อนการติดตั้งเข้ากับชุดทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองที่ไม่คลาดเคลื่อน และมีความถูกต้องตรงตามทฤษฎี
2. การออกแบบโตะทดลองที่ใช้ร่วมกับชุดทดลองควรออกแบบความสูงของโตะให้เหมาะสมกับระดับสายตาของผู้ทำการทดลอง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าจากเครื่องมือวัด
3. ก่อนการทดลองต้องมีการทดสอบระบบทุกครั้ง โดยการต่ออุปกรณ์และเครื่องมือวัดเข้ากับชุดทดลองให้เรียบร้อย และปล่อยแก๊สเข้าไปภายในส่วนท่อบรรจุแก๊ส ทำการจับเวลาและสังเกตค่าความดัน ถ้าความดันลดลงอย่างรวดเร็วให้ตรวจสอบที่บริเวณข้อต่อทุกตัวพร้อมกับแก้ไขโดยการหมุนเกลียวให้แน่น เพื่อให้ได้ผลการทดลองของแก๊สที่ต้องการศึกษาและลดค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง
4. แก๊สที่นำมาทดสอบที่จะนำมาใช้ในชุดทดลอง ควรทำการศึกษาข้อมูลความปลอดภัย เคมีภัณฑ์ มีการเลือกที่คำนึงถึงความปลอดภัยต่อผู้ทำการทดลองและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
5. การทดลองอาจปรับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง เพื่อทดสอบความแม่นยำของชุดทดลอง ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 10°C หรือช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 60°C
6. การนำชุดทดลองเรื่องพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สไปใช้ในการจัดการเรียนการสอน ควรดำเนินการให้สอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในการเรียนการสอน และให้เหมาะสมกับระดับชั้นและเนื้อหาวิชาเคมีหรือวิชาฟิสิกส์ เพื่อประสิทธิภาพทางการเรียนของผู้เรียนเป็นสำคัญ
7. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการหาค่าพลังงานภายในของแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่ ในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีปริมาตรคงที่ เพื่อคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะเมื่อปริมาตรคงที่ระหว่างแก๊สอะตอมเดี่ยวและแก๊สโมเลกุลคู่

บรรณานุกรม

- กระทรวงศึกษาธิการ. (2551). *หลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- กระทรวงศึกษาธิการ. (2551). *ตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, ยุทธนา ดันติรุ่งโรจน์ชัย, ทินกร เตียนสิงห์ และพรสวรรค์ อมรศักดิ์ชัย. (2556). *เคมี 1*. กรุงเทพฯ: แมคกรอฮิล.
- ประธาน บุรณศิริ, สุรชาติ กมลดิถก, กิรยุทธ ศรีนวลจันทร์, กางปัญญา สุวรรณสุขโข, ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ และชาติ ทีณะ. (2558). *ฟิสิกส์ 1-Physics For Scientists and Engineers I*. กรุงเทพฯ: เซนเกจ เลนนิ่ง อินโด-ไชน่า.
- ปิยพงษ์ สิริทิดง. (2559). *ฟิสิกส์ 2 ระดับอุดมศึกษา*. กรุงเทพฯ: ท็อป.
- พรวดี มโนพญา. (2545). *การสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาสมบัติและทฤษฎีจลน์ของก๊าซ สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4*. วิทยานิพนธ์ปริญญาการศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- พินิติ รัตนานุกูล. (2553). *เคมี 3 (แก๊ส เทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลเคมี ไฟฟ้าเคมีจลนศาสตร์เคมี)*. กรุงเทพฯ: ด้านสุทธาการพิมพ์.
- สมชาย เกียรติกมลชัย. (2548). *การสร้างชุดสาธิตทางฟิสิกส์สำหรับการสอนวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมพงษ์ ใจดี. (2551). *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2 (สสาร คลื่นกล และอุณหพลศาสตร์)*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2555). *รายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 5*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสศ. ลาดพร้าว.

- อุไรวรรณ ธรรมรัตน์พคุณ. (2541). *ฟิสิกส์สถิติและความร้อน (statistical and thermal physics)*.
กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- Assael, M.J., Martin, J.P., & Tsolakis, T.F. (1996). *Thermophysical properties of fluids*. London:
Imperial College Press.
- Chad, L. (2010). *General Chemistry I Lecture 20*. USA.: University of Chicago.
- David, T. (2011). *Statistical Physics*. Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics.
UK: University of Cambridge.
- Engel, T., & Reid, P. (2010). *Thermodynamics, Statistical, Thermodynamics, & Kinetics*.
Washington: Pearson Education.
- Howard, D. (2015). *Thermodynamics and Chemistry*. Prentice-Hall: Pearson Education.
- Imai, I., Kamata, M., & Miura, N. (2003). A teaching tool for molecular kinetics. *Physics
Education*, 38(3), 254-257.
- Joseph, M. (2014). *Lecture notes on thermodynamics*. USA.: Department of Aerospace and
Mechanical Engineering, University of Notre Dame.
- Lehtinen, A., & Viiri, J. (2014). Using tablets as tools for learner-generated drawings in the
context of teaching the kinetic theory of gases. *Physics Education*, 49(3), 344-348.
- Mario, N., Evgeny, N., & Pogliani, L. (2007). The van der Waals equation: analytical and
approximate solution. *Journal of Mathematical Chemistry*, 43(4), 1437-1439.
- Mark, B. (2013). *Real gases*. Cambridge: Chiral.
- Poisson, E. (2000). *Statistical Physics I*. Department of Physics: University of Guelph.
- Pazun, J. (2012). *Thermal Properties of Matter (Microscopic models)*. Charlotte: Pearson Addison-
Wesley.
- Richet, P. (2001). *The Physical Basis of Thermodynamic*. New York: Kluwer Academic/Plenum.
- Syndicate, C., & Hart, J. (2002). *The Kinetic Theory of Gases*. New York: Harcourt.
- Stephen, K. (2005). *Properties of Gases*. Burnaby: Simon Fraser University.

Vallance, C. (2008). *Properties of Gases*. UK: Pearson Education.

Willian, Lane. C. (2003). *Temperature and pressure of an ideal gas; the equation of state*. East Lansing: Michigan State University.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส ที่อุณหภูมิต่างกัน

ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอะตอมเดี่ยว ที่อุณหภูมิต่างกัน

ตารางภาคผนวกที่ ก-1 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สฮีเลียม ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(°C)	T(K)	$P_f (10^5 \text{ N/m}^2)$			$\bar{E}_k \text{ (eV)}$			$\bar{E}_{k(av)} \text{ (eV)}$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.1708	1.1758	1.1758	0.0380	0.0381	0.0381	0.0381
20	293.15	1.1858	1.1883	1.1908	0.0385	0.0385	0.0386	0.0385
25	298.15	1.2008	1.1958	1.2033	0.0389	0.0388	0.0390	0.0389
30	303.15	1.2058	1.2158	1.2133	0.0391	0.0394	0.0394	0.0393
40	313.15	1.2208	1.2408	1.2308	0.0396	0.0402	0.0399	0.0399
50	323.15	1.2358	1.2608	1.2508	0.0401	0.0409	0.0406	0.0405
60	333.15	1.2658	1.2783	1.2658	0.0411	0.0415	0.0411	0.0412

ตารางภาคผนวกที่ ก-2 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน ความดัน $1.2132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(°C)	T(K)	$P_f (10^5 \text{ N/m}^2)$			$\bar{E}_k \text{ (eV)}$			$\bar{E}_{k(av)} \text{ (eV)}$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.1908	1.1858	1.1908	0.0386	0.0385	0.0386	0.0386
20	293.15	1.2008	1.1958	1.2008	0.0389	0.0389	0.0389	0.0389
25	298.15	1.2058	1.2058	1.2033	0.0391	0.0391	0.0390	0.0391
30	303.15	1.2158	1.2233	1.2133	0.0396	0.0397	0.0394	0.0395
40	313.15	1.2358	1.2408	1.2308	0.0401	0.0404	0.0399	0.0401
50	323.15	1.2483	1.2533	1.2508	0.0405	0.0406	0.0406	0.0406
60	333.15	1.2683	1.2733	1.2658	0.0411	0.0413	0.0412	0.0412

ตารางภาคผนวกที่ ก-3 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สฮีเลียม ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(°C)	T(K)	$P_f (10^5 \text{ N/m}^2)$			$\bar{E}_k \text{ (eV)}$			$\bar{E}_{k(av)} \text{ (eV)}$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.2633	1.2683	1.2583	0.0379	0.0380	0.0377	0.0379
20	293.15	1.2758	1.2883	1.2733	0.0382	0.0386	0.0382	0.0383
25	298.15	1.2933	1.3008	1.2958	0.0388	0.0390	0.0388	0.0389
30	303.15	1.2933	1.3133	1.2983	0.0388	0.0394	0.0389	0.0390
40	313.15	1.3208	1.3258	1.3108	0.0396	0.0397	0.0393	0.0395
50	323.15	1.3283	1.3583	1.3333	0.0398	0.0407	0.0400	0.0401
60	333.15	1.3458	1.3758	1.3558	0.0403	0.0412	0.0406	0.0407

ตารางภาคผนวกที่ ก-4 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน ความดัน $1.3132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(°C)	T(K)	$P_f (10^5 \text{ N/m}^2)$			$\bar{E}_k \text{ (eV)}$			$\bar{E}_{k(av)} \text{ (eV)}$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.2783	1.2608	1.2833	0.0384	0.0380	0.0386	0.0383
20	293.15	1.2833	1.2783	1.2958	0.0387	0.0384	0.0390	0.0387
25	298.15	1.3008	1.2908	1.3033	0.0391	0.0389	0.0392	0.0390
30	303.15	1.3133	1.3083	1.3133	0.0396	0.0392	0.0396	0.0394
40	313.15	1.3358	1.3458	1.3408	0.0402	0.0405	0.0403	0.0403
50	323.15	1.3808	1.3833	1.3758	0.0416	0.0416	0.0414	0.0415
60	333.15	1.3983	1.4008	1.3933	0.0420	0.0421	0.0419	0.0420

ตารางภาคผนวกที่ ก-5 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สฮีเลียม ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(°C)	T(K)	$P_f (10^5 \text{ N/m}^2)$			$\bar{E}_k \text{ (eV)}$			$\bar{E}_{k(av)} \text{ (eV)}$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.3458	1.3433	1.3533	0.0377	0.0376	0.0379	0.0378
20	293.15	1.3683	1.3633	1.3608	0.0383	0.0382	0.0381	0.0382
25	298.15	1.3733	1.3758	1.3908	0.0385	0.0386	0.0390	0.0387
30	303.15	1.4133	1.4208	1.4183	0.0396	0.0398	0.0397	0.0397
40	313.15	1.4233	1.4333	1.4283	0.0399	0.0402	0.0400	0.0400
50	323.15	1.4383	1.4633	1.4458	0.0403	0.0410	0.0405	0.0406
60	333.15	1.4608	1.4683	1.4658	0.0409	0.0412	0.0411	0.0411

ตารางภาคผนวกที่ ก-6 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สอาร์กอน ความดัน $1.4132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T(°C)	T(K)	$P_f (10^5 \text{ N/m}^2)$			$\bar{E}_k \text{ (eV)}$			$\bar{E}_{k(av)} \text{ (eV)}$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.3383	1.3408	1.3308	0.0375	0.0376	0.0373	0.0375
20	293.15	1.3708	1.3633	1.3658	0.0384	0.0382	0.0383	0.0383
25	298.15	1.3858	1.3808	1.3833	0.0388	0.0387	0.0388	0.0388
30	303.15	1.4133	1.4083	1.4133	0.0396	0.0395	0.0396	0.0396
40	313.15	1.4183	1.4258	1.4508	0.0397	0.0400	0.0407	0.0401
50	323.15	1.4608	1.4558	1.4658	0.0409	0.0408	0.0411	0.0409
60	333.15	1.4733	1.4708	1.4883	0.0413	0.0412	0.0417	0.0414

ผลการทดลองหาค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สโมเลกุลคู่ ที่อุณหภูมิต่างกัน

ตารางภาคผนวกที่ ก-7 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สไนโตรเจน ความดัน 1.2132×10^5
N/m²

T(°C)	T(K)	P _f (10 ⁵ N/m ²)			E _k (eV)			E _{k(av)} (eV)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.1833	1.1833	1.1908	0.0642	0.0642	0.0646	0.0643
20	293.15	1.1983	1.2008	1.1933	0.0650	0.0651	0.0647	0.0649
25	298.15	1.2058	1.2158	1.2108	0.0654	0.0659	0.0657	0.0657
30	303.15	1.2158	1.2233	1.2208	0.0659	0.0663	0.0662	0.0662
40	313.15	1.2333	1.2258	1.2408	0.0669	0.0665	0.0673	0.0669
50	323.15	1.2508	1.2433	1.2533	0.0678	0.0674	0.0680	0.0677
60	333.15	1.2633	1.2733	1.2758	0.0687	0.0691	0.0692	0.0689

ตารางภาคผนวกที่ ก-8 ผลการทดลองหาพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สออกซิเจน ความดัน 1.2132×10^5
N/m²

T(°C)	T(K)	P _f (10 ⁵ N/m ²)			E _k (eV)			E _{k(av)} (eV)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.1833	1.1858	1.1908	0.0640	0.0641	0.0644	0.0641
20	293.15	1.2058	1.2008	1.2008	0.0652	0.0649	0.0649	0.0650
25	298.15	1.2083	1.2058	1.2083	0.0653	0.0652	0.0653	0.0653
30	303.15	1.2133	1.2133	1.2133	0.0656	0.0656	0.0656	0.0656
40	313.15	1.2383	1.2458	1.2358	0.0669	0.0673	0.0668	0.0670
50	323.15	1.2558	1.2558	1.2533	0.0679	0.0679	0.0677	0.0678
60	333.15	1.2883	1.2808	1.2808	0.0696	0.0695	0.0692	0.0694

ตารางภาคผนวกที่ ก-9 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สไนโตรเจน ความดัน 1.3132×10^5
N/m²

T(°C)	T(K)	P _f (10 ⁵ N/m ²)			\bar{E}_k (eV)			$\bar{E}_{k(av)}$ (eV)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.2483	1.2508	1.2433	0.0627	0.0627	0.0623	0.0625
20	293.15	1.2683	1.2783	1.2683	0.0638	0.0640	0.0635	0.0637
25	298.15	1.2908	1.3058	1.3058	0.0647	0.0654	0.0654	0.0652
30	303.15	1.3133	1.3133	1.3133	0.0658	0.0658	0.0658	0.0658
40	313.15	1.3383	1.3308	1.3208	0.0671	0.0667	0.0662	0.0666
50	323.15	1.3558	1.3408	1.3433	0.0682	0.0672	0.0673	0.0675
60	333.15	1.3908	1.3733	1.3858	0.0697	0.0688	0.0694	0.0693

ตารางภาคผนวกที่ ก-10 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สออกซิเจน ความดัน 1.3132×10^5
N/m²

T(°C)	T(K)	P _f (10 ⁵ N/m ²)			\bar{E}_k (eV)			$\bar{E}_{k(av)}$ (eV)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.2583	1.2658	1.2633	0.0633	0.0636	0.0635	0.0635
20	293.15	1.2883	1.2908	1.2908	0.0648	0.0649	0.0649	0.0648
25	298.15	1.2983	1.3058	1.3058	0.0653	0.0656	0.0656	0.0655
30	303.15	1.3133	1.3133	1.3133	0.0660	0.0660	0.0660	0.0660
40	313.15	1.3358	1.3408	1.3258	0.0671	0.0674	0.0666	0.0671
50	323.15	1.3658	1.3633	1.3758	0.0687	0.0685	0.0692	0.0688
60	333.15	1.3933	1.4008	1.3858	0.0698	0.0704	0.0697	0.0700

ตารางภาคผนวกที่ ก-11 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สไนโตรเจน ความดัน 1.4132×10^5
N/m²

T(°C)	T(K)	P _f (10 ⁵ N/m ²)			E _k (eV)			E _{k(av)} (eV)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.3533	1.3458	1.3558	0.0628	0.0625	0.0629	0.0627
20	293.15	1.3783	1.3833	1.3808	0.0640	0.0642	0.0641	0.0641
25	298.15	1.3933	1.4008	1.4008	0.0647	0.0650	0.0650	0.0649
30	303.15	1.4133	1.4133	1.4133	0.0656	0.0656	0.0656	0.0656
40	313.15	1.4333	1.4383	1.4333	0.0665	0.0667	0.0665	0.0666
50	323.15	1.4558	1.4508	1.4583	0.0676	0.0673	0.0677	0.0675
60	333.15	1.4783	1.4833	1.4858	0.0686	0.0688	0.0689	0.0688

ตารางภาคผนวกที่ ก-12 ผลการทดลองพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สออกซิเจน ความดัน 1.4132×10^5
N/m²

T(°C)	T(K)	P _f (10 ⁵ N/m ²)			E _k (eV)			E _{k(av)} (eV)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10	283.15	1.3533	1.3488	1.3583	0.0634	0.0632	0.0637	0.0634
20	293.15	1.3733	1.3908	1.3758	0.0644	0.0652	0.0645	0.0647
25	298.15	1.4008	1.4033	1.4008	0.0656	0.0658	0.0656	0.0657
30	303.15	1.4133	1.4133	1.4058	0.0662	0.0662	0.0659	0.0661
40	313.15	1.4408	1.4483	1.4358	0.0675	0.0679	0.0673	0.0676
50	323.15	1.4658	1.4708	1.4758	0.0687	0.0689	0.0692	0.0689
60	333.15	1.4858	1.4933	1.4983	0.0696	0.0700	0.0702	0.0699

ภาคผนวก ข

ตารางแปลงหน่วยค่าความดัน

ตารางภาคผนวกที่ ข-1 การแปลงหน่วยค่าความดัน (Pressure conversion table)

Designation	psi	kPa	kg/cm ²	cm of H ₂ O	feet of H ₂ O	inches of Hg	mm of Hg	inches of H ₂ O	ounces per square inch	atmospheres	bar	mbar	Mpa
psi	1	6.894757	.070306958	70.306927	2.306723	2.03602	51.71486	27.68068	16	.068046	.06894757	68.9476	.00689
kPa	.1450377	1	.01019716	10.19745	.3345618	.2952997	7.50061	4.01472	2.320603	.009669235	.01	10	.001
kg/cm ²	14.223343	98.06694	1	1000.026	32.809312	28.95901	735.5588	393.711806	227.57349	.967841596	.98066494	1013.25	.09806
cm of H ₂ O	.0142229	.0980634	.00099997	1	.032808	.0289581	.7355372	.3937	.227566	.000967814	.000980634	.9806	.00098
feet of H ₂ O	.433515	2.968961	.03047912	30.48	1	.882646	22.4192	12	6.93624	.02949896	.02968961	29.689	.00298
inches of Hg	.4911542	3.386389	.0345316	34.53253	1.132957	1	25.4	13.595484	7.85847	.0334211	.03386389	33.8639	.00386
mm of Hg	.0193368	.1333225	.00135951	1.359554	.0446046	.039370079	1	.535255	.3093888	.0013157895	.001333225	1.33322	.00013
inches of H ₂ O	.03612628	.2490819	.00254219	2.54	.08333	.0735539	1.8682683	1	.57802	.00245825	.002490819	2.49089	.000249
ounces per square inch	.0625	.4309223	.004394308	4.394308	.14417	.12725125	3.23218	1.73004	1	.004252875	.004309223	4.309	.0004309
atmospheres	14.696	101.32535	1.033231	1033.2633	33.8995	29.9213	760	406.794	235.136	1	1.0132535	1013.25	.1013
bar	14.5038	100	1.019716	1019.7466	33.4833	29.53	750.0626	401.8596	232.0608	.986923	1	1000	0.1
mbar	0.0145	0.1	.001019	1.019	.003456	0.02953	0.75006	0.40146	.23206	0.00099	0.001	1	.0001
Mpa	145.0377	1000	10.197	10197.45	334.56	295.299	7500.61	4014.74	2320.603	9.669	10	10000	1