

Thermodynamics I

Assoc.Prof.Sommai Pripem, Ph.D.

Chapter 1 : Some Concepts and Definitions



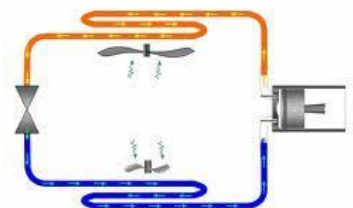
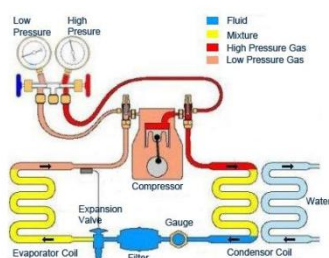
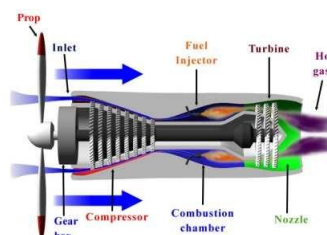
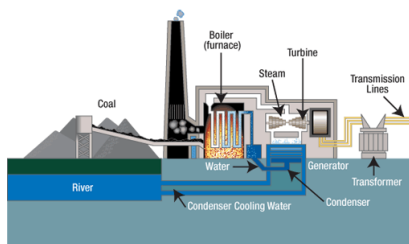
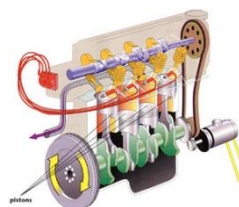
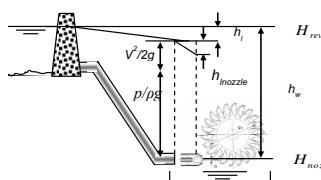
บทที่ 1

บทนำ

(Some Concepts and Definitions)

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตในปัจจุบัน ความสำเร็จของโลกจะเจริญต่อไปได้ก็ต่อเมื่อโลกมีแหล่งพลังงานเพียงพอต่อความต้องการ พลังงานแฝงมีอยู่ในหลายรูปแบบ แหล่งพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาตินั้นยังไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที ต้องมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานนั้นให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อความต้องการ

ในการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงานนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น การเปลี่ยนพลังงานศักย์ของน้ำที่อยู่ในที่สูงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยปล่อยให้น้ำไหลผ่านกังหันในโรงจักรไฟฟ้าพลังน้ำ พลังงานจากการเผาไหม้ถ่านหิน นำไปต้มน้ำให้เป็นไอน้ำ แล้วนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ ซึ่งจะขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง พลังงานของการสันดาปน้ำมันปิโตรเลียมทำให้อากาศขยายตัว เพื่อไปขับเคลื่อนกังหันสันดาปภายในและให้กำลังงานออกมา ฯลฯ เครื่องจักรที่ใช้เป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงานเหล่านี้ได้รับการพัฒนาเรื่อยมาอย่างไม่หยุดยั้ง วิศวกร จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความรู้ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์และเครื่องจักรเหล่านี้

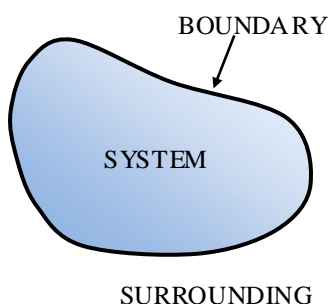


วิชาเทอร์โมไดนามิกส์ที่จะเรียนในที่นี้ เป็นเทอร์โมไดนามิกส์ประยุกต์สำหรับวิศวกร ซึ่งจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของพลังงานหลักคือ พลังงานความร้อนและพลังงานกล รวมทั้งคุณสมบัติของตัวกลางที่ทำหน้าที่เก็บและถ่ายทอดพลังงาน ซึ่งจะอธิบายโดยการยกตัวอย่างวิธีการต่าง ๆ ที่จะบังคับให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งสองรูปดังกล่าวเป็นไปตามความต้องการ โดยในเริ่มแรกนั้นจำเป็นจะต้องศึกษาถึงคุณสมบัติของสสาร ซึ่งจะใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดพลังงาน เพื่อความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลง สถานะ(state) สถานะ(phase) และพลังงาน(energy) ของมัน จากนั้นจะเป็นการอธิบายและการประยุกต์ใช้งานของกฎข้อที่หนึ่ง และกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานที่สำคัญในการใช้วิเคราะห์ระบบทางความร้อน และในท้ายสุดจะศึกษาถึงวัฏจักรต่าง ๆ ที่สำคัญซึ่งเป็นต้นแบบของเครื่องยนต์ต้นกำลังในปัจจุบัน และระบบทำความเย็น อัน ได้แก่ เครื่องยนต์เบนซิน (Gasoline engine) เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel engine) เครื่องยนต์กังหันแก๊ส (Gas turbine engine) เครื่องยนต์กังหันไอน้ำ (Steam turbine engine) ระบบการทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor compression refrigeration system)

เทอร์โมไดนามิกส์เป็นวิทยาศาสตร์ซึ่งว่าด้วยความร้อนและงาน และคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความร้อนและงานของสสาร เช่นเดียวกับศาสตร์ที่เป็นวิทยาศาสตร์อื่นๆ พื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์มาจากการสังเกตและทดลอง ศาสตร์ด้านนี้ได้เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ยุค การปฏิวัติอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเริ่มคิดสร้างเครื่องจักรไอน้ำ ซึ่งก็คือการเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาถ่านหินให้เป็นพลังงานกล โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายทอดพลังงาน งานกลที่ได้นั้นก็นำไปใช้งาน เช่น ขับเคลื่อนปั๊มสูบน้ำเพื่อสูบน้ำออกจากเหมือง ทำเป็นหัวจักรรถไฟ เป็นต้น ในช่วงการพัฒนาแรกๆ นั้น นักประดิษฐ์และวิศวกรจำนวนมากประสบความล้มเหลว ส่วนที่ใช้งานได้ดีก็ให้กำลังงานได้น้อย อีกทั้งมีประสิทธิภาพต่ำ จึงเป็นจุดกำเนิดให้เกิดการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของสสารที่ใช้เป็นสารตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกล รวมทั้งการพัฒนากลไกและระบบต่างๆ มากมาย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นจุดกำเนิดของศาสตร์ด้านเทอร์โมไดนามิกส์ และได้มีการศึกษาและพัฒนาต่อมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นทฤษฎีและกฎต่างๆ ของเทอร์โมไดนามิกส์จึงเกิดจากนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจำนวนมาก อีกทั้งยังอยู่ต่างยุคต่างสมัยกัน ซึ่งแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับกฎทางกลศาสตร์ทั้งสามข้อ ที่ Sir Isaac Newton เป็นผู้พัฒนาขึ้นเพียงคนเดียว นักวิทยาศาสตร์ได้มีประชุมสัมมนาเพื่อการประมวลองค์ความรู้ด้านนี้ และได้สรุปเป็นกฎพื้นฐาน ได้แก่ กฎข้อที่หนึ่ง ข้อที่สองและข้อที่สาม และเพื่อความสมบูรณ์จึงได้มีการตั้งกฎข้อที่ศูนย์เพิ่มเติมภายหลัง รวมเป็นกฎ 4 ข้อด้วยกัน

1.1 ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (The Thermodynamic System and the Control Volume)

ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้น มักจะมีความซับซ้อนอาจสับสนได้ง่าย เนื่องจากสารตัวกลางเป็นของไหล ซึ่งอาจมีการไหลเข้า ไหลออก เทคนิคที่จะช่วยให้การวิเคราะห์มีความชัดเจนนั้น คือ การกำหนดระบบ (System) ซึ่งจะทำโดยกำหนดขอบเขตของส่วนที่จะวิเคราะห์ (System boundary) โดยส่วนที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดเรียกว่า ระบบ (System) ส่วนที่อยู่ภายนอกเรียกว่า สิ่งแวดล้อม (Surrounding) ขอบเขตของระบบ (System boundary) นั้น สามารถขยายหรือหดตัวได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

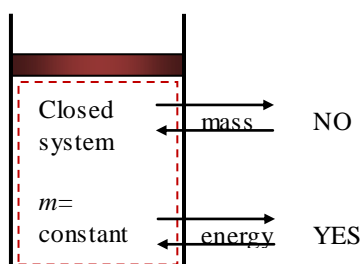


รูปที่ 1.1 แสดงการกำหนดขอบเขตของระบบ

การกำหนดระบบปิดนี้ อาจเปรียบเทียบได้คล้ายคลึงกับการเขียน Free body diagram สำหรับการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ ซึ่งใช้สำหรับวัตถุเกร็ง (Rigid body)

ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ แบ่งออกเป็น 3 แบบด้วยกันคือ

ก. ระบบปิด (Closed System) คือ ระบบที่ไม่มีการส่งถ่ายมวลเข้าหรือออกจากระบบ แต่จะมีการส่งผ่านความร้อนและงานอย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้ง 2 อย่าง ขอบเขตของระบบปิดนี้ กำหนดโดยเส้นล้อมระบบ (System boundary) ซึ่งอาจอยู่กับที่ เคลื่อนที่ ยืดหรือหดได้ ตัวอย่างของระบบปิดนี้ เช่น แก๊สในกระบอกสูบที่กำลังถูกอัดโดยการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ระบบคือแก๊สที่ถูกบีบอัด นั่นคือมีการส่งพลังงานกลเข้าสู่ระบบ (แก๊ส) ในขณะเดียวกันแก๊สเมื่อถูกอัดจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอาจเกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวแก๊ส (ระบบ) ไปสู่ภายนอก (สิ่งแวดล้อม)

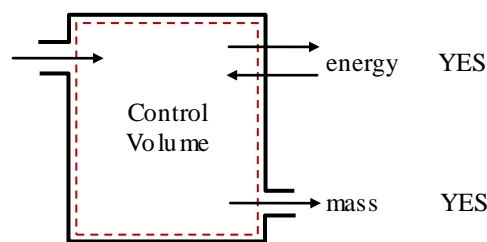


รูปที่ 1.2 ตัวอย่างของระบบปิด

ข. ระบบโดด (Isolate System) คือ ระบบที่ไม่มีอิทธิพล หรือเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมเลย

ค. ระบบเปิด (Open System หรือ Control Volume) คือ ระบบที่มีการไหลของมวล (มวลของสสารที่ใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดพลังงาน) เราไม่สามารถจะกำหนดขอบเขตของมวลนั้นได้ทั้งหมด และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จึงเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนที่อยู่ภายในอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่จะศึกษาเท่านั้น โดยสมมติพื้นผิวห่อหุ้มอุปกรณ์ที่จะศึกษา ปริมาตรภายในนั้นเรียกว่า ปริมาตรควบคุม (Control Volume) และพื้นผิวนั้นเรียกว่า ผิวควบคุม (Control Surface) โดยมวลรวมทั้งความร้อนและงานสามารถผ่านเข้าและออกจากผิวควบคุมได้

หากจะกล่าวไปแล้วระบบเกือบทั้งหมดของอุปกรณ์หรือเครื่องจักร เป็นระบบเปิด (Open system) โดยในบางช่วงขณะของการทำงานอาจเป็นระบบปิด (closed system) เช่น เครื่องยนต์ลูกสูบสี่จังหวะ (Four stroke piston engine) ซึ่งมีจังหวะ ดูดอัด กำลัง และคาย นั้น หากพิจารณาในภาพรวมของการทำงานของเครื่องยนต์ก็จะเป็นระบบเปิด เพราะจะมีอากาศถูกดูดเข้า และมีไอเสียถูกขับออกตลอดเวลา แต่หากเราสนใจวิเคราะห์ในแต่ละจังหวะการทำงาน (stroke) จังหวะดูดและคายต้องพิจารณาเป็นระบบเปิด (open system) เพราะมีการถ่ายเทมวลเข้าหรือออก ในขณะที่หากพิจารณาจังหวะอัดและจังหวะกำลัง ซึ่งลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียปิด ก็จะไม่มีการถ่ายเทมวลเข้าออก ดังนั้นจึงเป็นระบบปิด (closed system)



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างของระบบเปิด

1.2 การพิจารณาแบบจุลภาคและมหภาค (Macroscopic Versus Microscopic Point of View)

ในการวิเคราะห์ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบจุลภาคและมหภาค การวิเคราะห์แบบจุลภาค (Microscopic Point of view) จะพิจารณาถึงความเป็นไปของอะตอมของสสาร เป็นการอาศัยองค์ความรู้สมัยใหม่ที่ต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของสสารในระดับอะตอม ในการวิเคราะห์แบบนี้จะใช้สถิติเข้าช่วย ดังนั้นเทอร์โมไดนามิกส์ที่ว่าถึงการวิเคราะห์แบบจุลภาคจึงเรียกว่า เทอร์โมไดนามิกส์สถิติ (Statistical Thermodynamics) ส่วนการวิเคราะห์แบบมหภาค (Macroscopic Point of view) จะพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ โดยไม่สนใจว่าแต่ละ โมเลกุลของมันจะเป็นอย่างไร ซึ่งเรียกว่า Classical Thermodynamics สำหรับที่จะเรียนต่อไปนี้เป็นแบบหลัง

1.2 คุณสมบัติและสภาวะของสสาร (Properties and state of a Substance)

สสารสามารถคงอยู่ได้ในหลายรูปแบบด้วยกัน ตัวอย่างเช่น น้ำ สามารถอยู่ได้ทั้ง 3 สถานะ (Phase) คือของแข็ง ของเหลวและไอ ซึ่งในแต่ละสถานะก็ยังมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ในสถานะของเหลว น้ำร้อน น้ำเย็น น้ำอุ่นก็มีความแตกต่างกัน การที่จะบอกน้ำที่เรากำลังพิจารณาอยู่นี้เป็นอย่างไรนั้น จำเป็นจะต้องมีข้อกำหนดที่เป็นสากลเพื่อให้เข้าใจเป็นอย่างเดียวกัน ข้อกำหนดนั้น คือ สภาวะ (State)

ในการอธิบายหรือกำหนด “สภาวะ” ของสสาร เป็นการบอกคุณถึงสมบัติ (Property) ของสสาร ในขณะนั้น คุณสมบัติที่เราจะรู้จักกันดี ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความหนาแน่น เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติต่างๆแต่ละคุณสมบัติของสสารที่สภาวะหนึ่งๆ จะมีเพียงค่าเดียวเท่านั้น เช่น น้ำที่ 20°C ณ ความดัน 100 kPa เป็นน้ำที่สภาวะหนึ่งซึ่งเป็นคนละสภาวะกับน้ำที่ 80°C ที่ความดัน 100 kPa น้ำในสภาวะทั้งสองถึงแม้จะอยู่ในสถานะเป็นของเหลวเหมือนกัน อยู่ภายใต้ความดันเดียวกันแต่มีอุณหภูมิต่างกัน นั่นก็หมายความว่ามันอยู่ในคนละสถานะ คุณสมบัติอื่นๆจะแตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่นจะต่างกัน พลังงานที่อยู่ภายในตัวมันแตกต่างกัน ดังนั้นในการพิจารณาทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้นจึงต้องแยกแยะและกำหนดให้ชัดเจนว่าสสารที่กำลังพิจารณานั้นๆอยู่ในสภาวะใด ในการบอกหรือกำหนดสภาวะนั้นจะต้องบอกคุณสมบัติของสสารที่ไม่ขึ้นต่อกันอย่างน้อย 2 ตัว เช่น บอก อุณหภูมิและความดัน (ในกรณีที่ไม่อยู่ในสถานะอิมพัลส์) หรือ อุณหภูมิและปริมาตรจำเพาะ เป็นต้น และเมื่อทราบค่าคุณสมบัติของสสารที่ไม่ขึ้นต่อกัน 2 ตัวดังกล่าวแล้วก็จะสามารถหาคุณสมบัติอื่นๆที่เหลือได้ ซึ่งรายละเอียดในเรื่องนี้จะกล่าวถึงในบทที่ 2

คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสสาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

ก. คุณสมบัติเฉพาะตัว (Intensive Property) เป็นคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวลของสสาร ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะตัวจะมีค่าคงเดิม ไม่ว่ามวลของสสารจะมีปริมาณมากหรือน้อยหรือมีปริมาณเปลี่ยนไป ตัวอย่างของคุณสมบัติเฉพาะตัว ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะ พลังงานภายในจำเพาะ (Specific Internal Energy) เป็นต้น

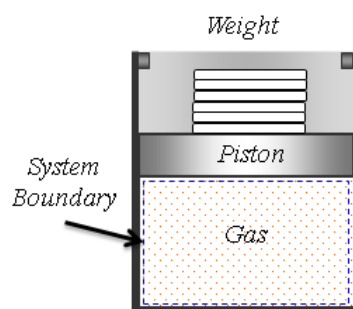
ข. คุณสมบัติอิงมวล (Extensive Property) เป็นคุณสมบัติที่แปรผันไปตามมวลของสสาร นั่นคือคุณสมบัติอิงมวลจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณ มวลของสสาร ตัวอย่างของคุณสมบัติอิงมวล ได้แก่ ปริมาตร พลังงานภายใน (Internal Energy) เป็นต้น

คุณสมบัติของระบบ (Property of system) ที่สภาวะสมดุล (Equilibrium) คุณสมบัติต่างๆ ของสสารที่อยู่ภายในระบบจะเท่ากันหมด และไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น เราถือว่าคุณสมบัติของสสารเป็นคุณสมบัติของระบบด้วย สภาวะสมดุล (Equilibrium) ที่กล่าวถึงนี้หมายถึง การที่คุณสมบัติของสารในระบบอยู่ในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เว้นแต่มีการกระทำจากภายนอก โดยประกอบด้วย สมดุล

ทางความร้อน (Thermal equilibrium) ก็คืออุณหภูมิเท่ากันหมดทั้งระบบ ทำให้ไม่มีแรงขับเคลื่อนให้เกิดการไหลของความร้อน สมดุลทางกล (Mechanical equilibrium) ก็คือแรงทางกลจะต้องสมดุล ในระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้นแรงจะเกี่ยวข้องกับความดัน การสมดุลของแรงในระบบนั้นจะเกิดเมื่อความดันในระบบ ณ จุดใดจุดหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ความดันในระบบจะแตกต่างกันได้เนื่องจากสสารอยู่คนละระดับ ส่วนที่อยู่ระดับต่ำกว่าจะมีความดันสูงกว่า แต่จะไม่เกิดการไม่สมดุลของแรง เนื่องจากผลของน้ำหนักของมวลสารที่อยู่ในระดับเหนือขึ้นไปกดทับ สมดุลทางสถานะ (Phase equilibrium) คือระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ และ สมดุลทางเคมี (Chemical equilibrium) คือระบบที่องค์ประกอบทางเคมีคงที่

1.4 กระบวนการและวัฏจักร (Process and Cycle)

ในระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือในระหว่างการเปลี่ยนนั้นจะมีคุณสมบัติตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวเปลี่ยนแปลงไป เมื่อคุณสมบัติหนึ่งหรือหลายคุณสมบัติของระบบเปลี่ยนแปลงไป เราเรียกว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ความเป็นไปของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งนี้เรียกว่า กระบวนการ (Process) ในการวิเคราะห์สิ่งที่เกี่ยวข้องในแต่ละกระบวนการนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของระบบ เนื่องจากเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลในระบบ ปัญหาคือในระหว่างการเปลี่ยนแปลงซึ่งเสียสภาพสมดุลไปนี้ เราจะสามารถบอกคุณสมบัติของระบบได้อย่างไร เพราะตามนิยาม คุณสมบัติของระบบคือคุณสมบัติของสสารที่สถานะสมดุล (Equilibrium) แนวคิดคือหากพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างช้าๆและแบ่งการเปลี่ยนแปลงออกเป็นช่วงๆซึ่งแต่ละช่วงนั้นเวลาต่างกันน้อยมาก (น้อยจนเข้าใกล้ศูนย์) ปริมาณของคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงแต่ละช่วงก็จะน้อยมาก และเสมือนเข้าสู่สมดุลในแต่ละช่วง กระบวนการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เรียกว่า กระบวนการสมดุลเสมือน (Quasi-equilibrium process) ซึ่งจะใช้เป็นรูปแบบในการวิเคราะห์ที่ง่ายกว่าการวิเคราะห์ในสภาพที่เกิดขึ้นจริงอย่างมาก



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างของระบบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบสมดุล เสมือน

พิจารณารูปที่ 1.4 ถ้ายกก้อนน้ำหนักออกจะเกิดการไม่สมดุลทางกล ลูกสูบจะถูกดันให้เคลื่อนที่ขึ้น จนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุล นั่นคือ เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบโดยปริมาตรเพิ่มขึ้น ความดันลดลง ในกรณีนี้เราไม่สามารถจะบอกได้ว่าในระหว่างเกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น สภาวะของระบบจะเป็นอย่างไร เพราะเราจะบอกคุณสมบัติของระบบได้ต่อเมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลเท่านั้น

พิจารณารูปที่ 1. 4 อีกครั้ง ถ้าเราเอาก้อนน้ำหนักออกเพียงครั้งละเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของระบบจะเปลี่ยนไปน้อยมากในแต่ละครั้ง ทุกครั้งที่สมดุล เราก็สามารถกำหนดสภาวะของระบบได้ นั่นคือเราสามารถกำหนดสภาวะของระบบในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ กระบวนการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เรียกว่า กระบวนการสมดุลเสมือน (Quasi-equilibrium process) ดังที่กล่าวข้างต้นนั่นเอง ถ้ายกน้ำหนักออกครั้งเดียวทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงก็จะเป็นกระบวนการไม่สมดุล (Non-quasi-equilibrium-process) ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงสภาวะสมดุลจึงจะหยุด เราจึงไม่สามารถที่จะกำหนดการเปลี่ยนแปลง หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น แต่จะสามารถหาผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงได้ โดยการสมมติว่าในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดการสมดุลชั่วขณะขึ้นตลอดการเปลี่ยนแปลง

ในหลายกระบวนการ เมื่อกระบวนการนั้นเกิดขึ้นแต่คุณสมบัติบางอย่างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง จึงตั้งชื่อกระบวนการแบบนี้โดยใช้คำนำหน้า (Prefix) ว่า Iso และต่อท้ายด้วยชื่อคุณสมบัติที่คงที่นั้น เป็นชื่อของกระบวนการนั้น ๆ เช่น

Isothermal process หมายถึง กระบวนการอุณหภูมิคงที่

Isobaric process หมายถึง กระบวนการความดันคงที่

Isometric process หมายถึง กระบวนการปริมาตรคงที่

เมื่อระบบอยู่ที่สภาวะเริ่มต้น (Initial state) แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงไปยังสภาวะอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นมีกี่สภาวะก็ตาม แต่ท้ายสุดกลับมาสู่สภาวะเดิม (เริ่มต้น) อีกครั้ง แล้ววนซ้ำเช่นนี้ต่อไป จะเรียกว่า ระบบดำเนินไปครบ วงจรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Cycle) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกเพียงสั้นๆ คำว่า “วัฏจักร” (Cycle) ต้องพึงระวังว่า วงจรทางเทอร์โมไดนามิกส์นี้แตกต่างจากวัฏจักรทางกล อาจเป็นไปได้ว่าเครื่องจักรกลทำงานเป็นวัฏจักรแต่เมื่อพิจารณาสถานะของสสารแล้ว ระบบนั้นอาจจะไม่เป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ก็ได้ หากสภาวะของสสารไม่กลับสู่สภาวะเริ่มต้น ตัวอย่างเช่น เครื่องยนต์ลูกสูบสี่จังหวะ หากคิดสภาวะเริ่มต้นคือ อากาศที่ถูกดูดเข้ากระบอกสูบ อากาศจะมีอุณหภูมิและความดันเท่ากับบรรยากาศ แต่ช่วงสุดท้ายในจังหวะคาย ไอเสียที่ทิ้งออกมามีอุณหภูมิและความดันสูงกว่าบรรยากาศ (รวมทั้งไอเสียก็ไม่ใช่อากาศ) นั่นคือสภาวะสุดท้ายไม่ได้กลับไปสู่สภาวะเริ่มต้น การทำงานของเครื่องยนต์นี้จึงไม่เป็นวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic cycle) แต่ทำงานเป็นวัฏจักรทางกล (Mechanical cycle)

1.5 หน่วยของ มวล ความยาว เวลาและแรง (Units for Mass, Length, Time, and Force)

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ จำเป็นต้อง เกี่ยวข้องกับปริมาณต่าง ๆ ซึ่งอาจวัดได้โดยตรงหรือโดยทางอ้อม ดังนั้นการศึกษาเรื่องของหน่วยจึงเป็นเรื่องจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการคำนวณ การแทนค่าตัวเลขต่างๆในสมการที่ใช้ จะต้องแทนด้วยปริมาณตามหน่วยที่ต้องใช้ หากใช้หน่วยผิด เช่น จะต้องแทนค่าตัวแปรในสมการซึ่งเป็นความยาวด้วยหน่วยที่เป็น “เมตร ” แต่กลับแทนด้วยค่าที่เป็น “เซนติเมตร” ก็จะได้คำตอบผิดไป 100 เท่าตัว ซึ่งเป็นเรื่องที่จะสร้างความเสียหายอย่างยิ่ง ถ้าเกิดขึ้นในการออกแบบและคำนวณทางวิศวกรรม ดังนั้นนักศึกษาจำเป็นต้องใช้ความละเอียดรอบคอบในการแทนค่าตัวแปร ว่าต้องใช้หน่วยใด ควรใส่หน่วยกำกับไว้ท้ายตัวเลขเสมอ และตรวจสอบหน่วยของผลที่ได้จากการคำนวณด้วยว่าเป็นหน่วยอะไร มิใช่รู้เพียงหน่วยที่ต้องการเท่านั้น หน่วยที่ใช้ในหนังสือเล่มนี้คือ หน่วยสากล (International System หรือ SI units)

ชวนคิด ?

มีเงินเป็น ธนบัตร 1,000 บาท 5 ฉบับ และธนบัตร \$US 100 จำนวน 2 ฉบับ มีเงินเท่าไร

หน่วยพื้นฐานของเวลาคือ วินาที (second, s) สมัยก่อนได้ถือเอาการหมุนของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นเกณฑ์ แต่เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนได้ ในปี 1967 The General Conference of Weights and Measures (CGPM) จึงได้จำกัดความของวินาทีใหม่ในรูปของ resonator ซึ่งใช้ลำแสงของอะตอม cesium-113 เวลาที่ใช้สำหรับ 9,192,631,770 รอบของ cesium resonator คือเวลา 1 วินาที หน่วยของเวลาอื่นที่ใช้เสมอๆ ได้แก่ นาที ชั่วโมง และวัน ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่หน่วยสากลก็ตาม

หน่วยของความยาว มีหน่วยพื้นฐานเป็น เมตร (meter, m) ก่อนหน้านี้ใช้ความยาวมาตรฐานซึ่งเป็นระยะระหว่างสองจุดของแท่ง platinum-iridium ที่วางอยู่ในสถานะที่กำหนด แท่งโลหะนี้รักษาไว้ที่ International Bureau of Weights and Measures ประเทศฝรั่งเศส ต่อมาในปี 1960 CGPM ได้ยอมรับการจำกัดความของความยาว 1 เมตร ในรูปของความยาวคลื่นของแสงสีส้ม-แดง ของ krypton-86 คือ

1 เมตร เท่ากับ คลื่นจำนวน 1,650,763.73 คลื่น ของแสงสีส้ม-แดง ของ kr-86 ในสุญญากาศ

ในหน่วยสากลมีหน่วยของมวลคือ กิโลกรัม (kilogram, kg) ซึ่งกำหนดโดย CGPM ในปี 1889 และย้ายอีกในปี 1901 คือมวลของทรงกระบอก platinum-iridium รักษาไว้ภายใต้สถานะที่กำหนดที่ International Bureau of Weights and Measures

หน่วยของแรงจำกัดความจากกฎข้อที่สองของนิวตัน คือ

$$F = ma$$

แรง มีหน่วยว่า นิวตัน (Newton, N) ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงที่ใช้ในการทำให้มวลหนึ่งกิโลกรัมมีความเร่งหนึ่งเมตรต่อวินาที

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m/s}^2$$

คำว่า น้ำหนัก (weight) มักใช้เมื่อกล่าวถึงวัตถุ ซึ่งอาจทำให้สับสนกับคำว่ามวล เพราะน้ำหนักคือแรง ถ้ากล่าวถึงวัตถุมีน้ำหนักมากนั้นหมายถึง แรงที่วัตถุนั้นกระทำต่อโลกหรือต่อวัตถุอื่น ซึ่งก็คือมวลของวัตถุคูณกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่ตำแหน่งนั้น มวลของสสารไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับ แต่น้ำหนักจะเปลี่ยนไปตามระดับ

บางครั้งในการใช้หน่วยพื้นฐานนี้จะทำให้มีค่าตัวเลขมากหรือน้อยเกินไป เพื่อให้ได้ตัวเลขที่เหมาะสมจึงมักใช้ตัวคูณมาประกอบกับหน่วยพื้นฐานดังแสดงในตาราง 1.1

multiple	Prefix, symbol	multiple	Prefix, symbol
10^{12}	tera, T	10^{-3}	milli, m
10^9	giga, G	10^{-6}	micro, μ
10^6	mega, M	10^{-9}	nano, n
10^3	kilo, k	10^{-12}	pico, p

ตาราง 1.1 ตัวคูณหน่วย

1.6 ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

ปริมาตรจำเพาะของสสารนิยามว่าเป็นปริมาตรต่อหน่วยมวล และให้สัญลักษณ์เป็น v นั่นคือ

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m^3}{kg}$$

ส่วนความหนาแน่นของสสารนั้นคือมวลในหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งก็คือส่วนกลับของปริมาตรจำเพาะนั่นเอง ความหนาแน่นมีสัญลักษณ์เป็น ρ

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{kg}{m^3}$$

1.7 ความดัน (Pressure)

นิยามของความดัน คือ แรงในแนวตั้งฉากที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่ มีสัญลักษณ์เป็น P โดยหน่วยพื้นฐานของความดันมีค่าเท่ากับแรงหนึ่งนิวตันกระทำบนพื้นที่หนึ่งตารางเมตร เรียกว่า ปาสกาล (Pascal, Pa) นั่นคือ

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

หน่วยอื่นที่นิยมใช้ได้แก่หน่วย บาร์ (bar)

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

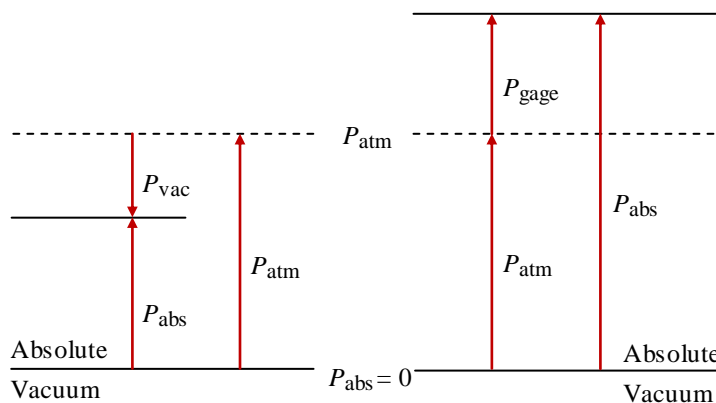
และความดันบรรยากาศมาตรฐาน

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa}$$



ในหนังสือเล่มนี้ปกติแล้วจะใช้หน่วย SI คือ ปาสคาล และ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กิโลปาสคาล (kPa) และเมกะปาสคาล (MPa)

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์มักเกี่ยวข้องกับความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure) ซึ่งก็คือความดันทั้งหมดที่กระทำต่อผนัง ความดันที่กระทำต่อผนังโดยบรรยากาศ เรียกว่า ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งและระดับบนผิวโลก ความดันเกจ (gage pressure) มีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างความดันสัมบูรณ์กับความดันบรรยากาศ ซึ่งวัดได้โดยใช้เครื่องมือซึ่งใช้ความดันบรรยากาศเป็นความดันอ้างอิง สุญญากาศ (vacuum) คือความดันของระบบที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งบางครั้งก็เรียกเป็น ความดันเกจลบ (negative gage pressure) ความสัมพันธ์ของความดันดังกล่าว แสดงได้ด้วยรูปที่ 1.4



$$P_{\text{gage}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{vac}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}}$$

รูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ของ ความดัน

ตัวอย่างที่ 1.1 เมื่อต่อเครื่องวัดความดันสุญญากาศเข้ากับถังบรรจุแก๊สไบนิ่ง ปรากฏว่าอ่านค่าความดันได้ 5.4 kPa ถ้าบริเวณดังกล่าวมีความดันบรรยากาศเป็น 96 kPa ให้หาความดันสัมบูรณ์ภายในถัง

วิธีทำ จาก $P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vac}}$
 ดังนั้น $P_{\text{abs}} = 96.0 - 5.4 \text{ kPa}$
 $= 90.6 \text{ kPa}$

เพราะฉะนั้น ความดันสัมบูรณ์ภายในถังมีค่าเท่ากับ 90.6 kPa

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.2 จงคำนวณความดันบรรยากาศในหน่วย kPa สำหรับบริเวณที่ใช้บาโรมิเตอร์วัดความดันได้ 740 mmHg เมื่อกำหนดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) เท่ากับ 9.81 m/s^2 และอุณหภูมิของปรอทเป็น 10°C ซึ่งเป็นสภาวะที่ปรอทมีความหนาแน่นเป็น $13,570 \text{ kg/m}^3$

วิธีทำ จากสมการ $P_{\text{atm}} = \rho gh$

แทนค่าได้ $P_{\text{atm}} = (13,570 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.74 \text{ m})$

$= 98.5 \text{ kPa}$

เพราะฉะนั้น ความดันบรรยากาศมีค่าเป็น 98.5 kPa

ตอบ

1.8 ความเท่ากันของอุณหภูมิ (Equality of Temperature)

แม้ว่าอุณหภูมิเป็นคุณสมบัติที่เราคุ้นเคยกันดี แต่เป็นการยากมากที่จะให้คำจำกัดความว่าอุณหภูมิคืออะไร เราคุ้นเคยกับอุณหภูมิครั้งแรกจากความรู้สึกร้อนหรือเย็น แต่ความรู้สึกของคนไม่สามารถจะแยกแยะความแตกต่างของอุณหภูมิได้เสมอไป เราจึงต้องหาตัวกลาง (เครื่องมือ) เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิ ถ้าเรานำโลหะที่ร้อนและเย็นมาสัมผัสกัน จากประสบการณ์เรารู้ว่าโลหะที่ร้อนกว่าจะเย็นลง และโลหะที่เย็นกว่าจะร้อนขึ้น ถ้าเราวัดความต้านทานไฟฟ้า ความยาวและใช้เทอร์โมมิเตอร์ปรอทวัด โลหะทั้งสองตั้งแต่เริ่มแรกจะพบว่ามีความเปลี่ยนแปลง คือโลหะร้อนจะมีความต้านทานไฟฟ้าลดลง ความยาวลดลงและระดับปรอทในเทอร์โมมิเตอร์ลดลง สำหรับโลหะเย็นนั้นก็จะเป็นในทางตรงกันข้าม ถ้าเราปล่อยให้โลหะทั้งสองสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องต่อไปจนกระทั่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อีกต่อไปแล้ว เราสรุปได้ว่าในขณะนั้นวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน

1.9 กฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์ (The Zeroth Law of Thermodynamics)

ลองพิจารณาโลหะทั้งสองนั้นอีกครั้ง ถ้านำโลหะ อันแรกมาสัมผัสกับ เทอร์โมมิเตอร์ปรอท จนกระทั่งทั้งสองมีความเท่ากันทางอุณหภูมิ จากนั้นนำเทอร์โมมิเตอร์อันนั้นไปสัมผัสกับโลหะอันที่สอง ถ้าระดับปรอทในเทอร์โมมิเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะสรุปได้ว่า โลหะทั้งสอง มีความสมดุลทางความร้อน (Thermal equilibrium) กับเทอร์โมมิเตอร์ตัวนั้น

กฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวว่า “ถ้าวัตถุสองอันมีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุที่สามแล้ว วัตถุทั้งสองนั้นก็มีอุณหภูมิเท่ากัน” นี่เป็นสิ่งที่เห็นชัดเจนมากสำหรับเรา แต่ความจริงอันนี้ไม่ได้กล่าวไว้ใน

กฎอื่นใดเลย ดังนั้นจึงได้ตั้งกฎข้อนี้ขึ้น แต่เป็นการตั้งหลังจากได้ตั้งกฎข้อที่หนึ่งและสองแล้ว ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมจึงให้ชื่อเป็นกฎข้อที่ศูนย์

1.10 สเกลอุณหภูมิ (Temperature Scales)

สเกลที่เราใช้วัดอุณหภูมิคือ สเกลเซลเซียส(Celsius scale) ซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น $^{\circ}\text{C}$ เดิมนั้นเรียกว่า สเกลเซนติเกรด (Centigrade scale) ชื่อปัจจุบันนี้ตั้งเพื่อเป็นเกียรติแก่นักดาราศาสตร์ชาวสวีเดน ชื่อ Anders Celsius (1701-1744) ผู้ที่ตั้งสเกลนี้ขึ้นมา โดยใช้จุดเยือกแข็ง และจุดเดือดของน้ำที่บรรยากาศ เป็นเกณฑ์ และแบ่งสเกลระหว่าง 2 จุดนี้เป็น 100 หน่วย นอกจากนี้ยังมีสเกลอื่นๆ อีกหลายสเกล แต่ สเกลเหล่านี้ล้วนใช้คุณสมบัติของสสารเป็นเกณฑ์ จึงได้ มีการ กำหนดสเกลสัมบูรณ์ (Absolute scale) ขึ้นมา สเกลสัมบูรณ์ที่สัมพันธ์กับสเกลเซลเซียส มีชื่อว่า สเกลเคลวิน (Kelvin scale) มีสัญลักษณ์เป็น K (ไม่มีเครื่องหมายของศา) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$



ตัวอย่างที่ 1.3 ในระหว่างกระบวนการหล่อเย็น พบว่าอุณหภูมิของระบบลดลง 27°C จงคำนวณหา อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วย K

วิธีทำ จาก $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$

$$\text{ดังนั้น } \text{K} = 27^{\circ}\text{C} + 273.15$$

$$= 300.15 \text{ K}$$

เพราะฉะนั้น อุณหภูมิของระบบลดลง 300.15 K

ตอบ

Concussion : สรุปท้ายบทที่ 1

เนื้อหาหลักของบทนี้จะว่าด้วยความรู้พื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยศึกษาเกี่ยวกับพลังงานหลัก คือ พลังงานความร้อนและพลังงานกล ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 10 หัวข้อย่อย โดยมีใจความสำคัญดังนี้

1. ระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ (The Thermodynamics System and the Control Volume) 3 แบบ คือ

- ระบบปิด (Closed System) คือ ระบบที่ไม่มีการส่งถ่ายมวลเข้าหรือออกจากระบบ
- ระบบโดด (Isolated System) คือ ระบบที่ไม่มีอิทธิพลหรือเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมเลย
- ระบบเปิด (Open System or Control Volume) คือ ระบบที่มีการถ่ายโอนมวลและพลังงาน ทำให้ไม่สามารถกำหนดขอบเขตได้

2. การพิจารณาแบบจุลภาคและมหภาค (Macroscopic Versus Microscopic Point of View)

- การวิเคราะห์แบบจุลภาค (Microscopic Point of View) พิจารณาลึกลงถึงระดับอะตอม
- การวิเคราะห์แบบมหภาค (Macroscopic Point of View) พิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ

3. คุณสมบัติและสถานะของสสาร (Properties and state of a Substance)

เมื่อเราต้องการพิจารณาสารใดสารหนึ่งนั้น เพื่อให้เข้าใจเป็นอย่างเดียวกัน จะต้องกำหนดสถานะ (State) ขึ้นมา โดยสถานะของสสารจะเป็นตัวบอกคุณสมบัติ (Property) ของสสารนั้นๆ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสสารมี 2 ลักษณะ คือ

- คุณสมบัติเฉพาะตัว (Intensive Property) คือ คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวลของสสาร มีค่าคงที่
- คุณสมบัติอิงมวล (Extensive Property) คือ คุณสมบัติที่แปรผันไปตามมวลของสาร

4. กระบวนการและวัฏจักร (Process and Cycle)

กระบวนการ คือ การเปลี่ยนแปลงของสถานะ

วัฏจักร คือ ระบบที่เกิดกระบวนการ โดยเริ่มจากสถานะเริ่มต้น เปลี่ยนแปลงไปยังสถานะอื่น ซึ่งอาจมีหลายสถานะ แต่ท้ายสุดก็กลับมาสู่สถานะเริ่มต้นอีกครั้ง แล้ววนซ้ำเช่นนี้ต่อไป

5. หน่วย (Unit)

มวล (Mass) หน่วยสากล คือ กิโลกรัม (kilogram, kg)

ความยาว (Length) หน่วยสากล คือ เมตร (meter, m)

เวลา (Time) หน่วยสากล คือ วินาที (second, s)

แรง (Force) หน่วยสากล คือ นิวตัน (Newton, N)

6. ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) คือ ปริมาตรต่อหน่วยมวล หน่วยคือ m^3/kg

$$v = \frac{V}{m}$$

ความหนาแน่น (Density) คือ มวลในหนึ่งหน่วยปริมาตร หน่วยคือ kg/m^3

$$\rho = \frac{m}{V}$$

7. ความดัน (Pressure) คือ แรงในแนวตั้งฉากที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่ สัญลักษณ์ P หน่วยเรียกว่า ปาสคาล (Pascal, Pa)

$$P_{\text{gage}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{vac}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}}$$

โดย P_{gage} = ความดันเกจ (gage pressure)

P_{abs} = ความดันสัมบูรณ์ (absolute pressure)

P_{atm} = ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure)

P_{vac} = สุญญากาศ

8. ความเท่ากันของอุณหภูมิ (Equality of Temperature)

เมื่อนำวัตถุที่มีอุณหภูมิต่างกันมาสัมผัสกันจนกระทั่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆอีก สรุปได้ว่า ณ ขณะนั้นวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน

9. กฎข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์ (The Zeroth Law of Thermodynamics)

“..ถ้าวัตถุสองอันมีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุที่สามแล้ว วัตถุทั้งสองนั้นมีอุณหภูมิเท่ากัน..”

10. สเกลอุณหภูมิ (Temperature Scale)

ใช้สเกลมาตรฐานเป็นสเกลสัมบูรณ์ ซึ่งสัมพันธ์กับสเกลเซลเซียส มีชื่อว่า สเกลเคลวิน

$$K = ^\circ\text{C} + 273.15$$

Exercises : แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1

Source: Cengel, Y.A., and Boles, M.A., THERMODYNAMICS :An Engineering Approach, 5th Edition in SI unit, McGraw-Hill, 2006.

Prepared by: Assoc.Prof.Sommai Priprem, PhD.

1-8 Determine the mass and the weight of the air contained in a room whose dimensions are 6m x 6m x 8m. Assume the density of the air is 1.16 kg/m^3 (Ans : 334.1 kg / 3277 N)

1-36 The temperature of the lubricating oil in an automobile engine is measured as 150°F . What is the temperature of this oil in $^\circ\text{C}$

1-38 Humans are most comfortable when the temperature is between 65°F and 75°F . Express these temperature limits in $^\circ\text{C}$. Convert the size of this temperature range (10°F) to K, $^\circ\text{C}$ and R. Is there any difference in the size of this range as measured in relative or absolute units?

1-56 Consider a 70-kg woman who has a total foot imprint area of 400 cm^2 . She wishes to walk on the snow, but the snow cannot withstand pressures greater than 0.5 kPa. Determine the minimum size of the snowshoes needed (imprint area per shoe) to enable her to walk on the snow without sinking.

1-63 A gas is contained in a vertical, frictionless piston-cylinder device. The piston has a mass of 4 kg and a cross-sectional area of 35 cm^2 . A compressed spring above the piston exerts a force of 60 N on the piston. If the atmospheric pressure is 95 kPa, Determine the pressure inside the cylinder. (Ans : 123.4 kPa)

1-67 A manometer containing oil ($\rho = 850 \text{ kg/m}^3$) is attached to a tank filled with air. If the oil-level difference between the two columns is 60 cm and the atmospheric pressure is 98 kPa, determine the absolute pressure of the air in the tank. (Ans : 103 kPa)