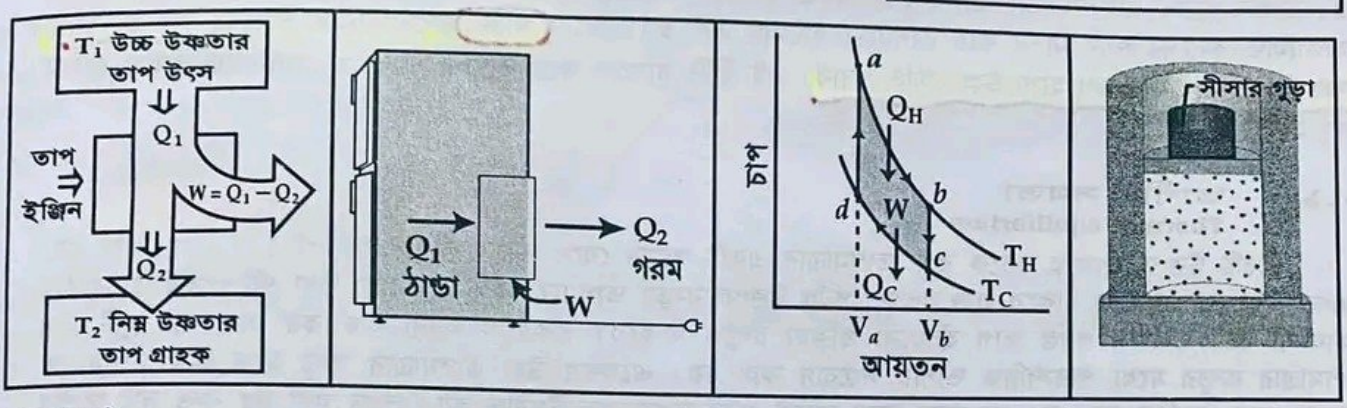
১

তাপগতিবিদ্যা
THERMODYNAMICS

প্রধান শব্দ (Key Words) : তাপীয় সমতা, তাপমাত্রা, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র, তাপীয় সিস্টেম, অভ্যন্তরীণ শক্তি, তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র, প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া, অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া, কার্নো-চক্র, তাপ ইঞ্জিন, রেফ্রিজারেটর বা হিমায়ক, কার্যকৃত সহগ, ইঞ্জিনের দক্ষতা, এনট্রপি।



সূচনা
Introduction

তাপ ও তাপমাত্রা পদার্থবিজ্ঞানের একটি অতি প্রয়োজনীয় বিষয়। পদার্থের ভৌতিক অবস্থা প্রকাশে তাপমাত্রার ভূমিকা বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। আমরা জানি যে কোনো পদার্থ অসংখ্য অণুর সমন্বয়ে গঠিত হয়। এই অণুগুলোর গতিশক্তি রয়েছে। তাপমাত্রা বৃদ্ধি করলে গতিশক্তি বৃদ্ধি পায় এবং কমালে গতিশক্তি হ্রাস পায়। তাপমাত্রা একটি পরিমাপযোগ্য রাশি। এই অধ্যায়ে আমরা তাপমাত্রা, তাপমাত্রা পরিমাপের নীতি, তাপীয় সমতা, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র, তাপীয় সিস্টেম, অভ্যন্তরীণ শক্তি, তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র, প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া, কার্নোর চক্র, তাপ ইঞ্জিন, রেফ্রিজারেটর আলোচনা করব।

এ অধ্যায় পাঠ শেষে শিক্ষার্থীরা—

- তাপমাত্রা পরিমাপের নীতি ব্যবহার করে তাপীয় সমতা এবং তাপমাত্রার ধারণা ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র, তাপীয় সিস্টেমের ধারণা এবং অভ্যন্তরীণ শক্তির ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- কোনো সিস্টেমের তাপ, তার অভ্যন্তরীণ শক্তি এবং সম্পন্ন কাজের মধ্যে সম্পর্ক বিশ্লেষণ করতে পারবে।
- তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র এবং প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার পার্থক্য ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- কার্নো চক্রের মূলনীতি ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- তাপ ইঞ্জিনের মূলনীতি এবং রেফ্রিজারেটরের কার্যক্রমের মূলনীতি ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- ইঞ্জিনের দক্ষতা, এনট্রপি এবং বিশৃঙ্খলা ব্যাখ্যা করতে পারবে।

১·১ তাপমাত্রা পরিমাপের নীতি
Principle of measurement of temperature

মনে কর তোমার পড়ার ঘরে একটি কাঠের তৈরি ক্রিকেট বল এবং একটি লোহার বল রাখা আছে। তুমি যদি দুটি বল একই সময়ে স্পর্শ কর তাহলে তোমার নিকট মনে হবে লোহার বলটি বেশি ঠান্ডা। যদিও বাস্তবে দুটি বলের তাপমাত্রা এক। তাই কেবল স্পর্শ দ্বারা তাপমাত্রা বা উষ্ণতা সম্পর্কে সঠিক ধারণা এবং পরিমাণ নির্ণয় করা যায় না। তাপমাত্রা বা উষ্ণতা হলো বস্তুর তাপীয় অবস্থা যা তাপ নির্ধারণ করে এবং বস্তুটিকে অন্য বস্তুর তাপীয় সংস্পর্শে রাখলে তাপ দেবে, না তাপ নেবে তাও নির্ধারণ করে। তাই তাপমাত্রা পরিমাপের জন্য পদার্থের একটি বিশেষ ধর্মের প্রতি লক্ষ রাখা হয় এবং যে সকল পদার্থের এই সকল ধর্ম আছে তা তাপমাত্রা পরিমাপক যন্ত্রে ব্যবহার করা হয়। বস্তুত এই মূলনীতিই তাপমাত্রা পরিমাপে ব্যবহার করা হয়। নিম্নে এ সম্পর্কে বিস্তারিত বর্ণনা করা হলো।

আমরা জানি, কোনো বস্তু কত গরম অথবা কত ঠান্ডা তা স্পর্শ করে সরাসরি বুঝা যায় না, অনুভব করা যায় মাত্র। এই কারণে তাপমাত্রার তারতম্যভেদে পদার্থের যে বিশেষ কোনো ধর্ম নিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় এবং যে ধর্মের পরিবর্তন লক্ষ করে সহজ-ও সূক্ষ্মভাবে তাপমাত্রা নিরূপণ করা যায় সেই পদার্থ বস্তুর তাপমাত্রা পরিমাপে ব্যবহৃত হয়।

সুতরাং বলা যায়, যে যন্ত্র দ্বারা বস্তুর তাপমাত্রা নির্ভুলভাবে পরিমাপ করা যায় তাকে তাপমান-যন্ত্র বা থার্মোমিটার (Thermometer) বলে।

তাপমাত্রার পরিবর্তনে পদার্থের যে বিশেষ বিশেষ ধর্ম নিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় এবং যে ধর্মের পরিবর্তন লক্ষ করে সহজ ও সঠিকভাবে তাপমাত্রা নির্ণয় করা যায় তাকে উষ্ণতামিতি ধর্ম (Thermometric properties) বলে এবং যে সকল পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্ম ব্যবহার করে থার্মোমিটার তৈরি করা হয় তাদেরকে উষ্ণতামিতি পদার্থ (Thermometric substances) বলে। সাধারণত উষ্ণতামিতি পদার্থের বা তার ধর্মের নাম অনুসারে থার্মোমিটারের নামকরণ করা হয়। যেমন পারদ থার্মোমিটার, রোধ থার্মোমিটার ইত্যাদি। থার্মোমিটার প্রস্তুতকালে এই উষ্ণতামিতি ধর্ম এবং উষ্ণতামিতি পদার্থের ওপর নির্ভর করে তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। যেমন পারদ থার্মোমিটারে পারদের প্রসারণ হলো উষ্ণতামিতি ধর্ম এবং পারদ হলো উষ্ণতামিতি পদার্থ। এই নীতি ব্যবহার করে তাপীয় সমতা ও তাপমাত্রার ধারণা ব্যাখ্যা করা হলো।

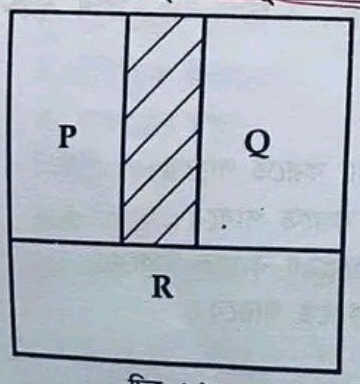
১.১.১ তাপীয় সমতা
Thermal equilibrium

একটি উত্তপ্ত লোহার বলকে কক্ষ তাপমাত্রার একটি স্থানে রেখে দাও। কী দেখতে পাবে ? দেখা যাবে যে, উত্তপ্ত বস্তু তাপ হারাতে থাকবে এবং যতক্ষণ পর্যন্ত উত্তপ্ত বস্তুর তাপমাত্রা কক্ষ তাপমাত্রা তথা পরিপার্শ্বের তাপমাত্রার সমান না হবে ততক্ষণ পর্যন্ত তাপ হারানো প্রক্রিয়া চলতে থাকবে। একইরূপ ঘটনা লক্ষ করা যায় যদি দুটি ভিন্ন তাপমাত্রার বস্তুর মধ্যে পারস্পরিক তাপীয় সংযোগ করা হয়। এক্ষেত্রে উচ্চ তাপমাত্রার বস্তু হতে নিম্ন তাপমাত্রার বস্তুতে তাপ প্রবাহিত হয় এবং এক সময় উভয় বস্তুই একই তাপমাত্রায় উপনীত হয়। তখন বলা হয় বস্তু দুটি তাপীয় সমতায় আছে।

অর্থাৎ একাধিক বস্তু যদি তাপীয়ভাবে সংযুক্ত থাকে এবং তাদের মধ্যে তাপের কোনো আদান প্রদান না ঘটলে বস্তুগুলি তাপীয় সমতায় আছে ধরা হয়। এ সংক্রান্ত তাপগতিবিদ্যার সূত্রটি হলো 'শূন্যতম সূত্র' বা Zeroth Law.

***

তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্র (Zeroth law of thermodynamics) : দুটি বস্তু যদি তৃতীয় কোনো বস্তুর সাথে তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকে তবে প্রথমোক্ত বস্তু দুটি পরস্পরের সাথে তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকবে। একে তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্র বলা হয়।



চিত্র ১.১

ব্যাখ্যা : দুটি বস্তু সাম্যাবস্থায় আছে, তা নির্ধারণের জন্য তৃতীয় একটি বস্তু ব্যবহার করা হয়। ধরা যাক P ও Q দুটি বস্তু একটি কুপরিবাহী দেওয়াল দিয়ে পৃথক করা অবস্থায় তৃতীয় একটি বস্তু R-এর সংস্পর্শে রাখা হলো [চিত্র ১.১]। কিছুক্ষণ পরে দেখা যাবে P ও Q উভয়ই তৃতীয় বস্তু R-এর সাথে তাপীয় সাম্যাবস্থায় পৌঁছবে। এখন কুপরিবাহী দেওয়ালটি সরিয়ে নিলেও P ও Q-এর তাপমাত্রায় কোনো পরিবর্তন হবে না। এ থেকে বুঝা যাচ্ছে যে দেওয়াল সরানোর আগেই P ও Q পরস্পর তাপীয় সাম্যাবস্থায় পৌঁছেছে। এই উদাহরণ থেকেই ওপরের সূত্র প্রমাণিত হয়। তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্র থেকে সরাসরি সিদ্ধান্ত গ্রহণ করা যায় যে, প্রতিটি বস্তুর এমন একটি ধর্ম আছে যা অন্য একটি বস্তুর সঙ্গে সমান হলে বস্তু দুটি পরস্পর তাপীয় সাম্যে থাকবে। এই ধর্মটিই হলো তাপমাত্রা। এই সূত্রের ওপর ভিত্তি করেই থার্মোমিটার তৈরি করা হয়েছে।

১.১.২ তাপমাত্রার ধারণা
Concept of temperature

গরম বা ঠাণ্ডার অনুভূতি আমাদের সকলেরই রয়েছে। সুতরাং কোনো একটি বস্তু কী পরিমাণ গরম বা ঠাণ্ডা তার পরিমাপকে ওই বস্তুর আপাত তাপমাত্রা বলে। অর্থাৎ আপাতভাবে বলা যায় তাপমাত্রা বলতে বস্তুর উত্তাপের পরিমাণ (degree of heat) বুঝায়। মনে কর দুটি বস্তু রয়েছে। একটি বস্তু A এবং অপরটি B। যদি স্পর্শ করলে A বস্তু B বস্তু অপেক্ষা বেশি গরম অনুভূত হয়, তবে আমরা বলতে পারি বস্তু A-এর তাপমাত্রা বেশি এবং বস্তু B-এর তাপমাত্রা কম। নিখুঁতভাবে তাপমাত্রার নিম্নলিখিত সংজ্ঞা দেয়া যেতে পারে :

সংজ্ঞা : তাপমাত্রা হলো বস্তুর একটি তাপীয় অবস্থা যা ওই বস্তু হতে অন্য বস্তুতে তাপের প্রবাহ নিয়ন্ত্রণ করে এবং তাপ প্রবাহের অভিমুখ নির্ধারণ করে।

উষ্ণতা তথা তাপমাত্রা পরিমাপের যন্ত্র নির্মাণে আমাদের এমন পদার্থের প্রয়োজন হয় তাপমাত্রা পরিবর্তনে যার কোনো না কোনো ধর্মের ব্যাপক পরিবর্তন ঘটে। উদাহরণস্বরূপ বলা যায়, প্লাটিনাম রোধ থার্মোমিটারে প্লাটিনামের রোধ

ব্যবহার করে এবং তড়িৎ রোধের উষ্ণতামিতি ধর্মের প্রতি লক্ষ রেখে তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। আবার থার্মোকাপল নামক থার্মোমিটারে দুটি ধাতব পদার্থের যুগল ব্যবহার করে তাপীয় তড়িচ্চালক শক্তির ধর্ম কাজে লাগিয়ে তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। আবার বিকিরণ পাইরোমিটারে উত্তপ্ত বস্তুর বিকিরণ ধর্ম কাজে লাগিয়ে 500°C এর উর্ধ্বের তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। এমনকি সূর্যের তাপমাত্রাও পাইরোমিটারের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়।

১.১.৩ তাপমাত্রা পরিমাপের বিভিন্ন স্কেলের মধ্যে সম্পর্ক
Relation among different scales of temperature measurement

তাপমাত্রা পরিমাপের জন্য বিভিন্ন তাপমান যন্ত্রে বিভিন্ন স্কেল ব্যবহার করা হতো। বিভিন্ন স্কেলে প্রতি ডিগ্রি তাপমাত্রার মান সমান নয়। একটি স্কেলের সাথে অন্যটির পুরাপুরি মিল নেই। এই অসুবিধা দূর করার জন্য আন্তর্জাতিক ওজন ও পরিমাপ কমিটি 1927 সালে তাপমাত্রার একটি ব্যবহারিক স্কেল অনুমোদন করেন। এর নাম আন্তর্জাতিক তাপমাত্রা স্কেল। তাপমাত্রার বিভিন্ন স্কেল হলো **সেলসিয়াস** (Celsius), **ফারেনহাইট** (Fahrenheit) এবং **কেলভিন** (Kelvin) স্কেল। এদের মধ্যে পারস্পরিক সম্পর্ক নিম্নরূপ :

$$\frac{C}{5}=\frac{F-32}{9}=\frac{K-273}{5}$$

ত্রুটিপূর্ণ থার্মোমিটারের ক্ষেত্রে বরফ বিন্দু M, স্টিম বিন্দু B, তাপমাত্রা S। আবার সেলসিয়াস, ফারেনহাইট এবং কেলভিন স্কেলের প্রকৃত তাপমাত্রা যথাক্রমে C, F এবং K হলে নিম্নের সমীকরণ এই সকল রাশির মধ্যে পারস্পরিক সম্পর্ক স্থাপন করে।

$$\frac{C}{100}=\frac{K-273{\cdot}15}{100}=\frac{F-32}{180}=\frac{S-M}{B-M}$$

তাপমাত্রার স্কেল নির্ধারণের সময় পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্ম কাজে লাগানো হয়। যদি বরফ বিন্দু ও স্টিম বিন্দুর তাপমাত্রা যথাক্রমে θ_{ice} এবং θ_{steam} এবং এই দুই তাপমাত্রায় উপরোক্ত কোনো একটি ধর্মের মান যথাক্রমে X_{ice} এবং X_{steam} এবং অন্য কোনো তাপমাত্রায় θ-তে ওই ধর্মের মান যদি X_θ হয় এবং মৌলিক ব্যবধানকে Nটি সমান ভাগে বিভক্ত করা হয়, তাহলে ওই তাপমাত্রায় θ এর মান হবে,

$$\frac{\theta-\theta_{ice}}{\theta_{steam}-\theta_{ice}}=\frac{X_\theta-X_{ice}}{X_{steam}-X_{ice}}$$

বা, $$\frac{\theta-\theta_{ice}}{N}=\frac{X_\theta-X_{ice}}{X_{steam}-X_{ice}} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.1)$$

সেলসিয়াস স্কেলে তাপমাত্রা : যে স্কেলে বরফ বিন্দুকে 0° এবং স্টিম বিন্দুকে 100° ধরে মধ্যবর্তী মৌলিক ব্যবধানকে 100 ভাগে ভাগ করা হয় সেই স্কেলকে সেলসিয়াস স্কেল বলে। এক্ষেত্রে প্রতি 1 ঘরের মান 1°C হয়।

সেলসিয়াস স্কেলে $\theta_{ice} = 0°C$, $\theta_{steam} = 100°C$ এবং $N = \theta_{steam} - \theta_{ice} = 100°C$, সেক্ষেত্রে উপরোক্ত সমীকরণ অনুযায়ী,

$$\frac{\theta-0°C}{100°C}=\frac{X_\theta-X_{ice}}{X_{steam}-X_{ice}}$$

বা, $$\theta=\frac{X_\theta-X_{icee}}{X_{steam}-X_{ice}}\times 100°C$$

রোধ থার্মোমিটার : রোধ থার্মোমিটারের ক্ষেত্রে উষ্ণতামিতিক ধর্ম হলো পরিবাহীর রোধ। θ°C, 0°C, 100°C তাপমাত্রায় পরিবাহীর রোধ যথাক্রমে R_θ, R_0, R_{100} হলে তাপমাত্রা,

$$\theta=\frac{R_\theta-R_0}{R_{100}-R_0}\times 100$$

অনুরূপভাবে, **ফারেনহাইট স্কেলে তাপমাত্রা :** এই স্কেলে বরফ বিন্দু 32° এবং স্টিম বিন্দু 212° ধরে মৌলিক ব্যবধান 180 ভাগে ভাগ করা হয়। প্রতি 1 ঘরের মান 1°F হয়।

ফারেনহাইট স্কেলে তাপমাত্রা নির্ণয়ের জন্য সমীকরণ (1.1) ব্যবহার করে পাই,

$$\frac{\theta-32°F}{180°F}=\frac{X_\theta-X_{ice}}{X_{steam}-X_{ice}}$$

এখানে $X_{ice} = 32°F$ এবং $X_{steam} = 212°F$

সুতরাং $X_{steam} - X_{ice} = 212°F - 32°F = 180°F$

বা, $$\theta=\frac{X_\theta-X_{icc}}{X_{steam}-X_{ice}}\times 180°F + 32°F$$

ফারেনহাইট থার্মোমিটার দ্বারা মানব দেহের তাপমাত্রা বা জ্বর পরিমাপ করা হয়। এই থার্মোমিটারে 95°F থেকে 110°F পর্যন্ত তাপমাত্রা পরিমাপ করা হয়। একে ডাক্তারি বা ক্লিনিক্যাল থার্মোমিটার বলে। এই থার্মোমিটার দ্বারা মানব দেহের সর্বোচ্চ তাপমাত্রা পরিমাপ করা যায় বলে একে চরম থার্মোমিটার বলে।

১.১.৪ স্থির বিন্দু ব্যবহার করে স্কেল নির্ধারণ সংক্রান্ত কয়েকটি রাশি
A few terms regarding determination of scale by using fixed point

ধরা যাক কোনো থার্মোমিটারে ব্যবহৃত উষ্ণতামিতি পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্মের মান X যার মান তাপমাত্রা T এর সাথে সুষমভাবে পরিবর্তিত হয়। তাহলে তাপীয় সাম্যাবস্থায় $T \propto X$

বা, $T = aX$, এখানে a একটি ধ্রুবক।

কোনো থার্মোমিটারে একটি স্থির বিন্দুর তাপমাত্রা T_p-তে কোনো উষ্ণতামিতি পদার্থের উষ্ণতামিতি ধর্মের মান X_p হলে উপরোক্ত সমীকরণে $a = \frac{T_p}{X_p}$ হয়।

সেক্ষেত্রে, $T = aX = \frac{T_p}{X_p}X = T_p\frac{X}{X_p}$

ত্রৈধবিন্দু (Triple point) : একটি নির্দিষ্ট চাপে যে তাপমাত্রায় কোনো পদার্থ কঠিন, তরল ও বায়বীয় রূপে সাম্যাবস্থায় থাকে তাকে ওই পদার্থের ত্রৈধবিন্দু বলে।

পানির ত্রৈধবিন্দু (Triple point of water) : 4·58 mm পারদ স্তম্ভ চাপে যে তাপমাত্রায় বিশুদ্ধ বরফ, পানি ও জলীয় বাষ্প একটি তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকে তাকে পানির ত্রৈধ বিন্দু বলে। পানির ত্রৈধ বিন্দু $T_{tr} = 273{\cdot}16$ K.

কেলভিন (Kelvin) : তাপমাত্রা বা তাপমাত্রা পরিবর্তনের এস. আই. একক হচ্ছে কেলভিন। পানির ত্রৈধবিন্দুর তাপমাত্রার $\frac{1}{273{\cdot}16}$ অংশকে এক কেলভিন (1 K) বলে।

তাপমাত্রার তাপগতীয় স্কেল বা পরম স্কেল (Thermodynamic scale or Absolute scale of temperature) : পানির ত্রৈধবিন্দুর তাপমাত্রাকে 273·16 K এবং ওই তাপমাত্রার $\frac{1}{273{\cdot}16}$ অংশকে এক কেলভিন ধরে তাপমাত্রার যে স্কেল গণনা করা হয় তাকে তাপগতীয় স্কেল বলে। এই স্কেল পদার্থের প্রকৃতি বা ধর্মের ওপর নির্ভরশীল নয়, কেবল তাপমাত্রার ওপর নির্ভরশীল, তাই একে তাপমাত্রার পরম স্কেলও বলে।

তাপমাত্রার আন্তর্জাতিক স্কেল (International scale of temperature) : পানির ত্রৈধ বিন্দুর তাপমাত্রাকে 273·16 K এবং ওই তাপমাত্রার $\frac{1}{273{\cdot}16}$ অংশকে এক কেলভিন ধরে এবং আরো কতগুলো সহজলব্ধ স্থির বিন্দু নির্ধারণ করে আন্তর্জাতিক ওজন ও পরিমাপ সংস্থা তাপমাত্রা পরিমাপের যে ব্যবহারিক স্কেল অনুমোদন করেছেন তাকে তাপমাত্রার আন্তর্জাতিক স্কেল বলে।

কয়েকটি পদার্থের তাপমাত্রার আন্তর্জাতিক স্কেলের জন্য নির্ধারিত স্থির বিন্দু

পদার্থ	অবস্থা	তাপমাত্রা (K)
নিয়ন	ত্রৈধবিন্দু	24·5561
অক্সিজেন	ত্রৈধবিন্দু	54·3584
আর্গন	ত্রৈধবিন্দু	83·8058
পারদ	ত্রৈধবিন্দু	234·3156
পানি	ত্রৈধবিন্দু	273·16
তামা	হিমাঙ্ক	1357·77
সোনা	হিমাঙ্ক	1337·33
রূপা	হিমাঙ্ক	1234·93
অ্যালুমিনিয়াম	হিমাঙ্ক	933·473
দস্তা	হিমাঙ্ক	692·677

গাণিতিক উদাহরণ ১.১

১। এমন একটি তাপমাত্রা বের কর যার মান সেলসিয়াস এবং ফারেনহাইট স্কেলে একই হয়।

মনে করি নির্ণেয় তাপমাত্রা $= x$

$\therefore$ আমরা পাই, $\frac{C}{5} = \frac{F-32}{9}$ ... ... (i)

এখানে, $C = F = x$

$\therefore$ সমীকরণ (i) হতে আমরা পাই, $\frac{x}{5} = \frac{x-32}{9}$

বা, $9x = 5x - 160$

বা, $9x - 5x = -160$

বা, $4x = -160$

$\therefore$ $x = \frac{-160}{4} = -40°$

উ: $-40°C$ এবং $-40°F$

২। কোন তাপমাত্রা সেলসিয়াস ও ফারেনহাইট স্কেলে 40° পার্থক্য হয় ?

মনে করি, সেলসিয়াস স্কেলে পাঠ $= x$

$\therefore$ ফারেনহাইট স্কেলে পাঠ $= x \pm 40$

আমরা জানি, $\frac{C}{5} = \frac{F-32}{9}$ ... ... (i)

$\therefore$ $\frac{x}{5} = \frac{x \pm 40 - 32}{9}$

বা, $9x = 5x \pm 200 - 160$

বা, $4x = \pm 200 - 160$

বা, $4x = 200 - 160$

বা, $4x = 40$

বা, $x = \frac{40}{4} = 10°C$

বা, $4x = -200 - 160° = -360°$

$\therefore$ $x = -\frac{360}{4} = -90°C$

কিন্তু যখন $C = x = 10°$, তখন সমীকরণ (i) অনুসারে,

$\frac{10}{5} = \frac{F-32}{9}$

$\therefore$ $F = 9 \times \frac{10}{5} + 32 = 50°$

এবং যখন $x = C = -90°$, তখন $-\frac{90}{5} = \frac{F-32}{9}$

$\therefore$ $F = -\frac{90}{5} \times 9 + 32 = -130°$

৩। একটি প্লাটিনাম রোধ থার্মোমিটার 0°C তাপমাত্রায় 2·57 ওহম এবং 100°C তাপমাত্রায় 3·53 ওহম পাঠ দেয়। 33·3°C তাপমাত্রায় যন্ত্রটি কত পাঠ দিবে ?

আমরা জানি,

$\theta = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100$ ... ... (i)

বা, $33·3 = \frac{R_t - 2·57}{3·53 - 2·57} \times 100$

বা, $R_t = 2·889$ ওহম

এখানে,

$\theta = 33·3°C$

$R_0 = 2·57$ ওহম

$R_{100} = 3·53$ ওহম

৪। 0°C ও 100°C তাপমাত্রায় একটি রোধ থার্মোমিটারের রোধ যথাক্রমে 9Ω ও 22Ω। থার্মোমিটারটি একটি চুলায় তরলের স্ফুটনাঙ্কে রাখলে রোধ পাওয়া যায় 36Ω। তরলের স্ফুটনাঙ্ক নির্ণয় কর।

আমরা জানি,

$$\theta = \frac{R_\theta - R_0}{R_{100} - R_0} \times 100°C$$

$$\therefore \quad \theta = \frac{36 - 9}{22 - 9} \times 100°C$$

$$= 207·7°C$$

এখানে,

0°C তাপমাত্রার রোধ, $R_0 = 9\Omega$

100°C তাপমাত্রার রোধ, $R_{100} = 22\Omega$

θ°C তাপমাত্রার রোধ, $R_\theta = 36\Omega$

নির্ণেয় তাপমাত্রা, $\theta = ?$

১·২ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র
First law of thermodynamics

১.২.১ ধারণা
Concept

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র আলোচনা করার আগে আমাদের জানা দরকার তাপগতিবিদ্যা কী ? আমরা জানি কাজ করার সামর্থ্যকে শক্তি বলে। বিভিন্ন প্রকার শক্তির সাথে আমরা পরিচিত। যেমন যান্ত্রিক শক্তি, তাপশক্তি, শব্দ শক্তি ইত্যাদি। এসব শক্তির মধ্যে পারস্পরিক রূপান্তর ঘটে। সব রূপান্তরের মধ্যেই দেখা যায় যে, সব রকম শক্তি অতি সহজেই তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। বিজ্ঞানী কাউন্ট রামফোর্ড, হ্যামফ্রে ডেভী এবং জেমস্ প্রেসকট জুল পরীক্ষা নিরীক্ষার সাহায্যে প্রমাণ করেন যে, কাজ তথা যান্ত্রিক শক্তি হতে তাপ উৎপন্ন হয় এবং তাপ গতিরই একটি রূপ। তাদের এই মতবাদ হতেই বস্তুত তাপগতিবিদ্যার সূত্রপাত। পদার্থবিজ্ঞানের যে শাখা তাপ ও যান্ত্রিক শক্তির পরস্পর রূপান্তর সম্পর্ক নিয়ে আলোচনা করে তাকে তাপগতিবিদ্যা (Thermodynamics) বলে।

তাপগতিবিদ্যার সূত্রাবলি আলোচনার পূর্বে তাপগতি সম্পর্কীয় কয়েকটি রাশির সংজ্ঞা আমাদের জানা প্রয়োজন।

(ক) তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম (Thermodynamic system) : তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম বলতে তা বা বেষ্টনী দ্বারা সীমাবদ্ধ কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ বস্তুকে বুঝায় যেখানে তাপগতীয় চলরাশি (চাপ, আয়তন, তাপমাত্র পরিমাপ করা যায়। যেমন একটি পিস্টনযুক্ত সিলিন্ডারে অথবা একটি বেলুনে আবদ্ধ গ্যাসকে আমরা তাপগতীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম বলে থাকি। কিন্তু ঢাকনাবিহীন হাঁড়িতে পানি ফোটানো হলে তাকে সিস্টেম বলা হয় না।

(খ) পরিপার্শ্ব (Surroundings) : একটি ব্যবস্থার আশেপাশের সব কিছুকে বলা হয় পরিপার্শ্ব। যেমন পিস্টন সিলিন্ডারের আশেপাশের বায়ু হলো এর পরিপার্শ্ব। অন্যভাবে বলা যায়, কোনো নির্দিষ্ট ব্যবস্থার সাথে শক্তি বিনিময় সক্ষম যে কোনো ব্যবস্থাকে ওই ব্যবস্থার পরিপার্শ্ব বলে।

(গ) তাপগতীয় স্থানাঙ্ক (Thermodynamic co-ordinates) : যে সকল রাশির মান কোনো ব্যবস্থার অবস্থা নির্ধারণ করে সেগুলিকে ব্যবস্থার তাপগতীয় স্থানাঙ্ক বলে।

যেমন সিলিন্ডারে আবদ্ধ গ্যাস হলো ব্যবস্থা এবং গ্যাসের অবস্থার বৈশিষ্ট্য নির্দেশ করে এর চাপ, আয়তন ও পরম তাপমাত্রা। তাই চাপ, আয়তন ও পরম তাপমাত্রাকে তাপগতীয় স্থানাঙ্ক বলে।

(ঘ) সাম্যাবস্থা (Equilibrium) : কোনো বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থার চূড়ান্ত অবিচল (steady) অবস্থাকে তাপগতীয় সাম্যাবস্থা বলে। সাম্যাবস্থায় ব্যবস্থার সকল বিন্দুতে তাপগতীয় স্থানাঙ্ক অর্থাৎ চাপ, আয়তন, তাপমাত্রার মান সমান

(ঙ) তাপগতীয় প্রক্রিয়া (Therodynamic process) : কোনো ব্যবস্থার তাপগতীয় স্থানাঙ্কসমূহের যে কোনো পরিবর্তনকে তাপগতীয় প্রক্রিয়া বলা হয়।

(চ) অভ্যন্তরীণ বা অন্তস্থ শক্তি (Internal energy) : কোনো সিস্টেমের মধ্যে যে শক্তি অন্তর্নিহিত বা সুপ্ত অবস্থায় থাকে যা পরিবেশ পরিস্থিতিতে বহিঃপ্রকাশ ঘটায় তাকে অভ্যন্তরীণ বা অন্তস্থ শক্তি বলে। সিস্টেমে তা প্রয়োগ করলে অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি পায়। আর তাপ প্রয়োগ না করলে অভ্যন্তরীণ শক্তি ধ্রুব (constant) থাকে। কোনো বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ভর করে চাপ, আয়তন এবং তাপমাত্রার সাথে কিছু ভৌত ধর্ম; যেমন আপেক্ষিক তাপ, প্রসারণ সহগ ইত্যাদির ওপর।

বিজ্ঞানী জুল সর্বপ্রথম কাজ ও তাপের মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করেন এবং সম্পর্কটি সূত্রাকারে প্রকাশ করেন। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র ব্যবহার করে সিস্টেমে সম্পাদিত কাজ, অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ণয় করা যায়। একে জুলের মতবাদ বলে। বিজ্ঞানী জুল নিম্নলিখিত উপায়ে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র বিবৃত করেন।

সূত্র : যখন কাজ সম্পূর্ণভাবে তাপে বা তাপ সম্পূর্ণভাবে কাজে রূপান্তরিত হয় তখন কাজ ও তাপ পরস্পর

ব্যাখ্যা : যদি W পরিমাণ কাজ সম্পূর্ণরূপে তাপে পরিণত হওয়ায় Q পরিমাণ তাপ উৎপন্ন হয়, তবে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রানুসারে, $W \propto Q$

বা, $W = JQ$ ... ... (1.2)

এখানে J একটি সমানুপাতিক ধ্রুবক। একে তাপের যান্ত্রিক সমতা (mechanical equivalent of heat) বা জুল তুল্যাঙ্ক (Joule's equivalent) বলে।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র শক্তির নিত্যতা সূত্রের একটি বিশেষ রূপ। বিজ্ঞানী ক্লসিয়াস (Clausius) এই সূত্রকে সাধারণভাবে প্রকাশ করেন। তাঁর মতে তাপশক্তি অন্য কোনো শক্তিতে রূপান্তরিত হলে কিংবা অন্য কোনো শক্তি তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হলে সিস্টেমের মোট শক্তির পরিমাণ একই থাকে। একে ক্লসিয়াসের মতবাদ বলে। বিজ্ঞানী ক্লসিয়াস নিম্নলিখিত উপায়ে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রকে বিবৃত করেন।

সূত্র : যখন কোনো ব্যবস্থায় (system) তাপ সরবরাহ করা হয় বা ব্যবস্থা কর্তৃক তাপ গৃহীত হয়, তখন এর কিছু অংশ অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি করতে অর্থাৎ তাপমাত্রা বৃদ্ধি করতে এবং অবশিষ্ট অংশ বাহ্যিক কাজ সম্পাদনে ব্যয় হয়। অর্থাৎ, প্রদত্ত তাপ = অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি + বাহ্যিক কাজ।

অনুসন্ধানমূলক কাজ : জলপ্রপাতের পানি ওপর হতে নিচে পড়লে নিচের পানির উষ্ণতা ওপরের পানির তুলনায় সামান্য বেশি হয়—ব্যাখ্যা কর।

ওপরের পানির স্থিতিশক্তি নিচে থাকা পানির তুলনায় বেশি। ওপর হতে পানি নিচে পড়ার সময় পানির এই স্থিতিশক্তি গতিশক্তিতে রূপান্তরিত হতে থাকে। ভূপৃষ্ঠ স্পর্শ করার মুহূর্তে পানির গতিশক্তি কিছুটা তাপশক্তি ও শব্দশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। এই তাপশক্তি অর্জনের জন্যই নিচের পানির উষ্ণতা সামান্য বৃদ্ধি পায়।

১.২.২ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের তাৎপর্য
Significance of the first law of thermodynamics

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের নিম্নলিখিত তাৎপর্য রয়েছে :

(১) এটি তাপ ও কাজের মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করে।

(২) এই সূত্র অনুযায়ী নির্দিষ্ট পরিমাণ কাজ পেতে হলে নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপের প্রয়োজন অথবা নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপ পেতে হলে নির্দিষ্ট পরিমাণ কাজ সম্পাদন করা প্রয়োজন।

(৩) কোনো কিছু ব্যয় না করে কাজ বা শক্তি পাওয়া অসম্ভব।

(৪) কাজ ও তাপ একে অপরের সমতুল্য।

(৫) এটি শক্তির সংরক্ষণ সূত্র ছাড়া আর কিছুই নয়। যে কোনো ব্যবস্থায় সম্পন্ন কাজ ও অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তনের সমষ্টি সর্বদা প্রযুক্ত তাপের সমান।

(৬) এমন কোনো যন্ত্রের উদ্ভাবন হয়নি যা জ্বালানি বা শক্তি ব্যতিরেকে কাজ করতে সক্ষম অর্থাৎ অনন্ত গতিযুক্ত যন্ত্র (perpetual motion machine) উদ্ভাবন সম্ভব নয় বা শক্তি ব্যয় না করে কোনো কাজ পাওয়া সম্ভব নয়।

১.২.৩ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যাখ্যা : তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি ও কাজের মধ্যে সম্পর্ক
Explanation of the first law of thermodynamics : Relation among heat, internal energy and work

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র ব্যবহার করে তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি এবং কাজের মধ্যে সম্পর্ক স্থাপন করা যায়। এছাড়া বিভিন্ন তাপীয় পদ্ধতিতে কাজের পরিমাণ জানা যায়। সিস্টেমটি তাপ গ্রহণ করছে না তাপ হারাচ্ছে এ সম্পর্কেও ধারণা পাওয়া যায়। নিম্নের ব্যাখ্যাগুলো লক্ষ কর :

কোনো সংস্থা dQ তাপ শোষণ করার জন্য এর অন্তর্নিহিত শক্তির পরিবর্তন du এবং কৃত কাজ dW হলে ব্যবকলনীয় সমীকরণের সাহায্যে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রকে লেখা যায়—

$$dQ = du + dW \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.3)$$

বা, $du = dQ - dW$

(1.3) নং সমীকরণটি শক্তির নিত্যতা সূত্রেরই একটি বিশেষ রূপ। সমীকরণ (1.3) হলো তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের গাণিতিক রূপ। এটি সকল বস্তুর ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য।

সমীকরণ (1.3)-এ dQ, du এবং dW রাশিগুলি নিম্নের শর্ত সাপেক্ষে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক হতে পারে।

শর্তসমূহ :

(i) dQ ধনাত্মক হবে যদি সিস্টেমে তাপ সরবরাহ করা হয় বা সিস্টেম তাপ গ্রহণ করে এবং ঋণাত্মক হবে যদি সিস্টেম তাপ হারায় বা সিস্টেম হতে তাপ পরিপার্শ্বে গমন করে।

(ii) সিস্টেমের অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি পেলে du ধনাত্মক এবং শক্তি হ্রাস পেলে du ঋণাত্মক হবে।

(iii) সিস্টেমের দ্বারা পরিপার্শ্বের ওপর কাজ সম্পাদিত হলে dW ধনাত্মক এবং পরিপার্শ্ব সিস্টেমের ওপর কাজ করলে dW ঋণাত্মক হবে।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র শক্তির নিত্যতা সূত্রের একটি বিশেষ রূপ
First law of thermodynamics is a special form of the principle of energy conservation

বিজ্ঞানী ক্লসিয়াসের মতে, কোনো সিস্টেমে তাপশক্তি অন্য কোনো শক্তিতে রূপান্তরিত হলে বা অন্য কোনো শক্তি তাপশক্তিতে রূপান্তরিত হলে সিস্টেমের মোট শক্তির পরিমাণ একই হবে। অর্থাৎ, তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রটি শক্তির নিত্যতা সূত্রের একটি বিশেষ রূপ।

যখন কোনো সিস্টেমে তাপ প্রয়োগ করা হয়, তখন তার কিছু অংশ বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি করে এবং বাকি অংশ পরিবেশের ওপর বাহ্যিক কার্য সম্পাদন করে। অর্থাৎ, শক্তির কোনো অপচয় হয় না। এক্ষেত্রে $\Delta Q = \Delta u + \Delta W$ হয়।

১.২.৪ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
Applications of the first law of thermodynamics

১. সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
Use of the first law of thermodynamics in isothermal process

যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের তাপমাত্রা স্থির থাকে কিন্তু চাপ ও আয়তন পরিবর্তিত হয় তাকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়া বলে। এই প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তির কোনো পরিবর্তন হয় না।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রকে গাণিতিকভাবে লেখা যায়,

$$dQ = du + dW$$

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় তাপমাত্রা স্থির থাকে, ফলে অন্তর্নিহিত বা অন্তস্থ শক্তি অপরিবর্তিত থাকে।

সুতরাং $du = 0$

অতএব, সমীকরণ (1.3)-কে লেখা যায়,

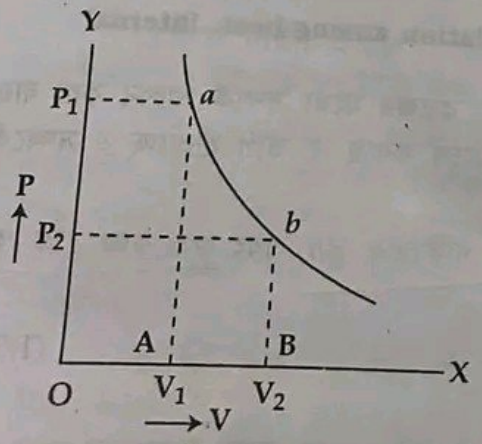
$$dQ = 0 + dW = dW \qquad \text{... ... (1.4)}$$

অর্থাৎ, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় সিস্টেম বা ব্যবস্থা কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সিস্টেমে সরবরাহকৃত বা গৃহীত তাপশক্তির সমান। সমীকরণ (1.4) সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের গাণিতিক রূপ।

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে, n মোল গ্যাসের জন্য, $PV = nRT$

বা, $P = \dfrac{nRT}{V}$

চিত্র ১.২



কোনো গ্যাসের আয়তন V_1 থেকে V_2-তে পরিবর্তনের জন্য কাজ,

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRTdV}{V} = nRT\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$= nRT\left[\ln V\right]_{V_1}^{V_2} = nRT\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

যেহেতু সমোষ্ণ পরিবর্তনের ক্ষেত্রে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন $\Delta u = 0$, কাজেই $dW = dQ$

বা, $W = Q = nRT\ln\left(\dfrac{V_2}{V_1}\right)$

কাজ: কোনো ব্যবস্থা ধ্রুব আয়তনে 500 J তাপ বর্জন করে। ব্যবস্থাটির অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর। ফলাফল ব্যাখ্যা কর।

$dQ = du + dW = du + PdV$

বা, $du = dQ - PdV$

$\therefore du = -500\,J + 0$ [$\because dQ = -500\,J$ এবং $dV = 0$]

$= -500\,J$ [অন্তস্থ শক্তি ঋণাত্মক হওয়ার অর্থ সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি হ্রাস পায়]

২. রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
Use of the first law of thermodynamics in adiabatic process

যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের তাপ ধ্রুব থাকে; কিন্তু চাপ ও আয়তন পরিবর্তিত হয় তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় তাপের আদান-প্রদান হয় না। তাই কোনো গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের ক্ষেত্রে, $dQ = 0$। সুতরাং

সমীকরণ (1.3) হতে পাই,

$dQ = 0 = du + dW$

বা, $du = -dW$

বা, $dW = -du$ ... ... (1.5)

রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় সিস্টেম কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সিস্টেমের অভ্যন্তরীণ শক্তি দ্বারা সম্পাদিত হয় বলে সিস্টেমের অভ্যন্তরীণ শক্তি তথা তাপমাত্রা হ্রাস পায় অর্থাৎ সিস্টেম শীতল হয়। পক্ষান্তরে **রুদ্ধতাপীয় সংকোচনে সিস্টেম উষ্ণ হয়। এক্ষেত্রে বাইরে থেকে শক্তি সরবরাহ করে কাজ সম্পন্ন করতে হয়।**

কোনো গ্যাসের প্রাথমিক অন্তর্নিহিত শক্তি u_1 এবং চূড়ান্ত অন্তর্নিহিত শক্তি u_2 হলে, সমীকরণ (1.5)-কে লেখা যায়,

$du = u_2 - u_1 = -dW$ ... ... (1.6)

$\therefore u_2 < u_1$

অর্থাৎ রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় বাহ্যিক কাজ করার জন্য অন্তর্নিহিত শক্তি হ্রাস পায়, ফলে তাপমাত্রাও হ্রাস পায়।

অনুরূপভাবে, রুদ্ধতাপীয় সংকোচন বা সংরক্ষণের ক্ষেত্রেও $dQ = 0$ হয়। সংকোচনের ক্ষেত্রে সিস্টেমের ওপর কাজ করা হয় বলে W ঋণাত্মক। সুতরাং সমীকরণ (1.5) হতে পাই,

$du = -(-dW) = dW$ ... ... (1.7)

বা, $u_2 - u_1 = dW$, এখানে u_1 ও u_2 যথাক্রমে সিস্টেমের প্রাথমিক ও চূড়ান্ত অন্তর্নিহিত শক্তি।

$\therefore u_2 > u_1$

অর্থাৎ **রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের সময় গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধি পায়, ফলে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়। সমীকরণ (1.5) ও (1.7) রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের গাণিতিক রূপ।**

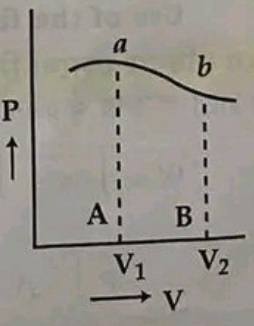
যেহেতু রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় সিস্টেমে তাপের কোনো আদান প্রদান হয় না, তাই $dQ = 0$। অতএব তাপগতি-বিদ্যার প্রথম সূত্র থেকে পাই,

$0 = du + dW$

$\therefore dW = -du$

প্রারম্ভিক অবস্থায় যদি কোনো গ্যাসের চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রা যথাক্রমে P_1, V_1 ও T_1 এবং চূড়ান্ত অবস্থায় এদের মান P_2, V_2 ও T_2 হয় তাহলে প্রারম্ভিক থেকে চূড়ান্ত অবস্থায় যেতে কৃত কাজ,

চিত্র ১·৩



$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে $PV^{\gamma} =$ ধ্রুবক

$$\therefore P = \frac{\text{ধ্রুবক}}{V^{\gamma}} = \frac{K}{V^{\gamma}}$$

সুতরাং $W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{K}{V^\gamma} dV = K \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV = K \left[\frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1}\right]_{V_1}^{V_2}$

$$= K\left[\frac{V^{1-\gamma}}{1-\gamma}\right]_{V_1}^{V_2} = \frac{K}{1-\gamma}\left[V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}\right] = \frac{1}{1-\gamma}\left[KV_2^{1-\gamma} - KV_1^{1-\gamma}\right]$$

$$= \frac{1}{1-\gamma}\left[P_2V_2^\gamma V_2^{1-\gamma} - P_1V_1^\gamma V_1^{1-\gamma}\right] \qquad [\because P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma = K]$$

$$= \frac{1}{1-\gamma}\left[P_2V_2 - P_1V_1\right] = \frac{1}{\gamma-1}\left[P_1V_1 - P_2V_2\right]$$

$$= \frac{1}{\gamma-1}\left[RT_1 - RT_2\right] \qquad [\because PV = RT]$$

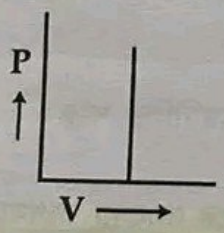
$$W = \frac{nR}{\gamma-1}\left[T_1 - T_2\right]$$

এই কাজ নির্দেশক চিত্র ১·৩-এর $aABb$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফলের সমান।

কাজ : রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি হ্রাস পায়। কিন্তু রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের সময় সিস্টেমের উষ্ণতা বৃদ্ধি পায় কেন ?

রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের সময় সিস্টেম কর্তৃক সম্পাদিত কাজ সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি দ্বারা সম্পাদিত হয় বলে সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি হ্রাস পায়। অর্থাৎ সিস্টেম শীতল হয়। পক্ষান্তরে রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের সময় বাইরে থেকে শক্তি সরবরাহ করে সিস্টেমের ওপর কাজ সম্পাদিত হয় বলে সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি বৃদ্ধি পায়, ফলে সিস্টেমের তাপমাত্রাও বৃদ্ধি পায়।

৩. ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
Use of the first law of thermodynamics in isochoric system



চিত্র ১·৪

যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের আয়তন ধ্রুব থাকে তাকে ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া বলে। এই প্রক্রিয়ায় তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র অনুযায়ী, $dV = 0$; অতএব কাজের পরিমাণ, $dW = PdV = 0$ অর্থাৎ সমআয়তন প্রক্রিয়ায় তাপগতির প্রথম সূত্রে অর্থাৎ $dQ = du + PdV$ সমীকরণে $PdV = 0$ বসিয়ে পাই, $dQ = du$। P — V লেখচিত্র ১·৪ সমআয়তন প্রক্রিয়া নির্দেশ করে। সমআয়তন প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ শূন্য।

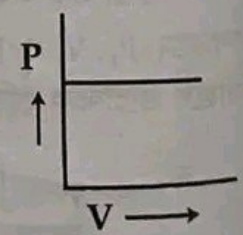
অর্থাৎ এই প্রক্রিয়ায় অন্তস্থ শক্তির বৃদ্ধি সরবরাহকৃত তাপশক্তির সমান। অন্যভাবে বলা যায় সমআয়তন প্রক্রিয়ায় সিস্টেমে প্রদত্ত তাপ পুরোটাই অভ্যন্তরীণ শক্তি বৃদ্ধির কাজে ব্যবহৃত হয়।

৪. সমচাপ প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের ব্যবহার
Use of the first law of thermodynamics in isobaric system

যে প্রক্রিয়ায় কোনো সিস্টেমের চাপ ধ্রুব থাকে তাকে ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়া বলে। সমচাপ বা স্থির চাপে গ্যাসের আয়তন V_1 থেকে V_2 তে পরিবর্তিত হলে গ্যাস কর্তৃক মোট কৃত কাজ,

$$W = \int dW = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

$$= P\int_{V_1}^{V_2} dV = P\left[V_2 - V_1\right] = P\Delta V$$



চিত্র ১·৫

অর্থাৎ কৃত কাজ = চাপ × আয়তনের পরিবর্তন। সমচাপ প্রক্রিয়ায় P — V

জানার বিষয় :

I. সমচাপ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ চাপ এবং আয়তনের পরিবর্তনের সমান।
II. সমআয়তন প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ শূন্য।
III. সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ সরবরাহকৃত তাপশক্তির সমান।
IV. রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় $dW = -dU$। অর্থাৎ কৃত কাজ অভ্যন্তরীণ শক্তি হ্রাস বা বৃদ্ধির সমান।

গাণিতিক উদাহরণ ১.২

১। কোনো সংস্থা পরিবেশ থেকে 800 J তাপশক্তি শোষণ করায় এর অন্তস্থ শক্তি 500 J বৃদ্ধি পেল। সংস্থা কর্তৃক পরিবেশের ওপর সম্পাদিত কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর। [কু. বো. ২০০৫]

আমরা জানি,

$$\Delta Q = \Delta u + \Delta W$$
$$\therefore \Delta W = \Delta Q - \Delta u$$
$$= 800\ J - 500\ J = 300\ J$$

এখানে,

$\Delta u = 500\ J$
$\Delta Q = 800\ J$
$\Delta W = ?$

২। পিস্টনযুক্ত একটি সিলিন্ডারে কিছু গ্যাস আবদ্ধ আছে। গ্যাসের চাপ 400 Pa-এ স্থির রেখে সিস্টেমে ধীরে ধীরে 800 J তাপশক্তি সরবরাহ করায় 1200 J কাজ সম্পাদিত হয়। গ্যাসের আয়তন এবং অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর। [কু. বো. ২০০৯; চ. বো. ২০০১]

আমরা পাই, $\Delta W = P(V_2 - V_1)$

$$\therefore 1200 = 400\ (V_2 - V_1)$$
$$\therefore (V_2 - V_1) = \frac{1200}{400} = 3\ m^3$$

আবার, $\Delta Q = \Delta u + \Delta W$

$$\therefore 800 = \Delta u + 1200$$
$$\therefore \Delta u = 800 - 1200 = -400\ J$$

এখানে,

$P = 400\ Pa$
$\Delta W = 1200\ J$
$\Delta V = (V_2 - V_1) = ?$
$\Delta u = ?$
$\Delta Q = 800\ J$

৩। 25°C তাপমাত্রা ও $1 \times 10^5\ Nm^{-2}$ চাপে একটি আদর্শ গ্যাসের আয়তন $0{\cdot}05 m^3$। স্থির চাপে গ্যাসটি উত্তপ্ত করায় এর আয়তন $0{\cdot}06 m^3$ হলো। (ক) বাহ্যিক সম্পাদিত কাজ ও (খ) গ্যাসের নতুন তাপমাত্রা নির্ণয় কর।

(ক) আমরা জানি,
বাহ্যিক সম্পাদিত কাজ, $W = P\Delta V$
বা, $W = 1 \times 10^5 \times 0{\cdot}01$
$= 1000\ J$

এখানে,
চাপ, $P = 1 \times 10^5\ Nm^{-2}$
আয়তন পরিবর্তন, $\Delta V = (0{\cdot}06 - 0{\cdot}05)\ m^3 = 0{\cdot}01\ m^3$

(খ) আমরা জানি,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$
বা, $$T_2 = \frac{V_2 T_1}{V_1}$$
$$\therefore T_2 = \frac{0{\cdot}06 \times 298}{0{\cdot}05} = 357{\cdot}6\ K$$

এখানে,
আদি আয়তন, $V_1 = 0{\cdot}05\ m^3$
চূড়ান্ত আয়তন, $V_2 = 0{\cdot}06\ m^3$
আদি তাপমাত্রা, $T_1 = 25°C = (273 + 25)\ K = 298\ K$
নতুন তাপমাত্রা, $T_2 = ?$

৪। একটি সীসার গুলি কত বেগে একটি অনমনীয় লক্ষ্যবস্তুকে আঘাত করলে গুলির তাপমাত্রা 1·12°C বৃদ্ধি পাবে ? ধরে লও যে, আঘাতে উৎপন্ন তাপ শুধু গুলি দ্বারা শোষিত হয়েছে। [সীসার আপেক্ষিক তাপ = 30 cal $kg^{-1}\,°C^{-1}$ এবং $J = 4{\cdot}2\ J\ cal^{-1}$]

মনে করি, গুলির ভর $= m\ kg$ এবং নির্ণেয় বেগ $= v\ ms^{-1}$
কৃত কাজ, $W = \frac{1}{2}mv^2$ এবং উৎপন্ন তাপ, $H = mst = m \times 30 \times 1{\cdot}12\ cal$

আমরা জানি, $W = JH$

$$\frac{1}{2}mv^2 = 4{\cdot}2 \times m \times 30 \times 1{\cdot}12$$
$$\therefore v = \sqrt{2 \times 4{\cdot}2 \times 30 \times 1{\cdot}12} = 16{\cdot}8\ ms^{-1}$$

৫। এক খণ্ড বরফ ওপর থেকে ভূমিতে পতিত হলো। এতে পতন শক্তির 50% তাপে রূপান্তরিত হওয়ায় বরফ খণ্ডটির এক চতুর্থাংশ গলে গেল। বরফ খণ্ডটি কত উচ্চতা হতে পতিত হয়েছিল নির্ণয় কর।

[বরফ গলনের সুপ্ত তাপ = 80000 cal kg^{-1} এবং তাপের যান্ত্রিক সমতা = 4·2 J cal^{-1}]

ধরি, বরফ খণ্ডটির ভর = m kg এবং নির্ণেয় উচ্চতা = h m

তা হলে পতনে কৃত কাজ = mgh

তাপ উৎপন্নে ব্যয়িত পতন শক্তি, $W = \frac{1}{2}mgh$ $[\because 50\% = \frac{1}{2}]$

উৎপন্ন তাপ, $H = \frac{W}{J} = \frac{mgh}{2J}$

আবার বরফ খণ্ডটির এক-চতুর্থাংশ গলতে প্রয়োজনীয় তাপ = $H = \frac{m}{4} \times L$

কিন্তু উৎপন্ন তাপেই বরফ খণ্ডটি গলেছে

$\therefore \quad \frac{mgh}{2J} = \frac{m}{4} \times L$

বা, $h = \frac{JL}{2g} = \frac{4{\cdot}2 \times 80000}{2 \times 9{\cdot}80}$ m

$= 17{\cdot}14$ km

৬। 10 g ওজনের একটি লোহার পেরেককে কিছুক্ষণ একটি বার্ণারের শিখায় উত্তপ্ত করা হলো। উত্তপ্ত পেরেকটিকে 10°C তাপমাত্রার 100 g পানিতে ডুবানো হলো। এতে পানির তাপমাত্রা বৃদ্ধি পেয়ে 20°C হলো। পানিতে ডুবানোর পূর্বে পেরেকের তাপমাত্রা নির্ণয় কর। লোহার আপেক্ষিক তাপ 0·11 Kcal/kg°C.

[BUET Admission Test, 2016–17]

আমরা জানি, গৃহীত তাপ,

$H = m_w S_w \Delta\theta$

$= 0{\cdot}1 \times 1 \times 10 = 1$ Kcal

পেরেক কর্তৃক বর্জিত তাপ,

$H = m_p S_p (\theta - 20)$

$= 0{\cdot}01 \times 0{\cdot}11 \times (\theta - 20)$

$\therefore \quad 1 = 0{\cdot}01 \times 0{\cdot}11 \times (\theta - 20)$

$\therefore \quad \theta = 929{\cdot}09°C$

১·৩ তাপীয় সিস্টেম
Thermal system

মনে কর, তাপ প্রয়োগে একটি গ্যাস ভর্তি সিলিন্ডারের সাথে যুক্ত একটি পিস্টনকে গতিশীল করা হলো। এক্ষেত্রে সিলিন্ডারযুক্ত পিস্টন একটি তাপীয় সিস্টেম। আর এর আশপাশের অন্য সকল বস্তু পরিবেশ বলে বিবেচিত হয়। দেখা যায় যে, তাপগতীয় ঘটনা বা সিস্টেমকে বর্ণনার জন্য তাপগতীয় স্থানাঙ্ক (thermodynamic co-ordinate) বা কয়েকটি গুরুত্বপূর্ণ রাশি যেমন চাপ (P), আয়তন (V) এবং তাপমাত্রা (T) এর প্রয়োজন হয়। **কোনো আবেষ্টনী দ্বারা আবদ্ধ কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ বস্তুকে তাপীয় ব্যবস্থা বা সিস্টেম হিসেবে ধরা হয়।** অন্যভাবে বলা যায়, **পরীক্ষা-নিরীক্ষার সময় আমরা জড় জগতের যে নির্দিষ্ট তাপীয় অংশ বিবেচনা করি তাকে তাপীয় সিস্টেম বলে।**

প্রত্যেক তাপীয় সিস্টেমের একটা নির্দিষ্ট আয়তন, ভর ও অন্তস্থ শক্তি থাকবে। তাপীয় সিস্টেম বিভিন্ন ধরনের হয়। যেমন—(১) উন্মুক্ত সিস্টেম (২) বদ্ধ সিস্টেম (৩) বিচ্ছিন্ন সিস্টেম।

উন্মুক্ত সিস্টেম পরিবেশের সাথে ভর ও শক্তি উভয়ই বিনিময় করতে পারে।

বদ্ধ সিস্টেম পরিবেশের সাথে শুধু শক্তি বিনিময় করতে পারে কিন্তু ভর বিনিময় করতে পারে না।

বিচ্ছিন্ন সিস্টেম পরিবেশ দ্বারা মোটেও প্রভাবিত হয় না। অর্থাৎ এক্ষেত্রে ভর ও শক্তি কিছুই বিনিময় করে না।

তাপীয় সিস্টেমে বিভিন্ন প্রকার তাপগতীয় পরিবর্তন
Different thermodynamical changes in thermal system

তাপগতিবিদ্যায় বিভিন্ন প্রকারের পরিবর্তন ঘটে। এই পরিবর্তন মোট চার প্রকারের; যথা—

(১) সমোষ্ণ পরিবর্তন (Isothermal change)
(২) রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন (Adiabatic change)
(৩) সমআয়তন পরিবর্তন (Isochronic change) এবং
(৪) সমচাপ পরিবর্তন (Isobaric change)

এখানে আমরা সমোষ্ণ পরিবর্তন এবং রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন আলোচনা করবো।

১.৩.১ সমোষ্ণ পরিবর্তন
Isothermal change

এটি একটি পরীক্ষিত ঘটনা যে, কোনো গ্যাসে চাপ প্রয়োগ করে হঠাৎ সংকুচিত করলে কিছু তাপ উৎপন্ন হয়। ফলে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়। কিন্তু উৎপন্ন তাপকে তৎক্ষণাৎ অপসারণ করে ধীরে ধীরে চাপ বৃদ্ধি করলে তাপমাত্রার কোনো পরিবর্তন ঘটবে না।

আবার গ্যাসকে হঠাৎ প্রসারিত করলে তা বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে কাজ করার সময় কিছু পরিমাণ তাপ হারাবে। ফলে এর তাপমাত্রা হ্রাস পাবে। কিন্তু গ্যাসকে যদি ধীরে ধীরে প্রসারিত করা হয় এবং বাইরে থেকে প্রয়োজনীয় তাপ সরবরাহ করা হয়, তবে গ্যাসের তাপমাত্রা স্থির থাকবে। এরূপ পরিবর্তনকে **সমোষ্ণ পরিবর্তন** বলা হয়। তাহলে দেখা যাচ্ছে যে, সমোষ্ণ পরিবর্তনে গ্যাসে কখনও তাপ সরবরাহ করে আবার কখনও গ্যাস হতে তাপ অপসারণ করে এর তাপমাত্রা সর্বদা স্থির রাখা যায়।

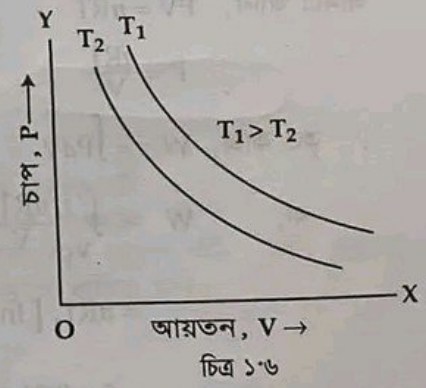
অর্থাৎ যে পরিবর্তনে কোনো গ্যাসের চাপের ও আয়তনের পরিবর্তন হয়, কিন্তু তাপমাত্রা স্থির থাকে সেই পরিবর্তনকে সমোষ্ণ পরিবর্তন (isothermal change) বলে এবং যে পদ্ধতিতে এই পরিবর্তন সংঘটিত হয় তাকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়া (isothermal process) বলে।

সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তনের সম্পর্ক বয়েলের সূত্র মেনে চলে। অর্থাৎ $P \propto \frac{1}{V}$

বা $PV =$ ধ্রুবক, এখানে P ও V যথাক্রমে চাপ ও আয়তন।

পরিকল্পিত কাজ : সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তনের সম্পর্ক বয়েলের সূত্র মেনে চলে। অর্থাৎ $P \propto \frac{1}{V}$ লেখচিত্রে সম্পর্কটি দেখাও এবং ব্যাখ্যা কর।

স্থির তাপমাত্রায় কোনো আদর্শ গ্যাসের আয়তন V-কে X-অক্ষ বরাবর এবং চাপ P-কে Y-অক্ষ বরাবর স্থাপন করে লেখচিত্র অঙ্কন করলে লেখটি আয়তাকার পরাবৃত্ত হবে [চিত্র ১·৬]। ভিন্ন তাপমাত্রায় একই আকৃতির ভিন্ন লেখ পাওয়া যায়। এই লেখগুলিকে সমোষ্ণ (Isothermal) লেখ বলা হয়।



চিত্র ১·৬

সমোষ্ণ পরিবর্তনের শর্তসমূহ
Conditions for isothermal change

(১) গ্যাসকে একটি সুপরিবাহী পাত্রে রাখতে হবে।
(২) পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা বা তাপধারণ ক্ষমতা উচ্চ হতে হবে।
(৩) চাপের পরিবর্তন ধীরে ধীরে সংঘটিত করতে হবে।
(৪) প্রয়োজনীয় তাপ গ্রহণ বা বর্জনের দ্বারা তাপমাত্রা স্থির থাকবে।

সমোষ্ণ পরিবর্তনের বৈশিষ্ট্য (Characteristics of isothermal change)

(১) তাপমাত্রা স্থির রেখে কোনো গ্যাসের চাপ ও আয়তনের পরিবর্তনকে সমোষ্ণ পরিবর্তন বলে।
(২) এই পরিবর্তনে প্রয়োজনমতো তাপ সরবরাহ অথবা গ্রহণ করতে হয়।
(৩) এটি একটি ধীর প্রক্রিয়া।
(৪) এই পরিবর্তনে পাত্রটি তাপের সুপরিবাহী হওয়া প্রয়োজন।
(৫) এই পরিবর্তনে পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা উচ্চ হতে হয়।
(৬) সমোষ্ণ পরিবর্তন বয়েল-এর সূত্র মেনে চলে অর্থাৎ $PV =$ ধ্রুবক।
(৭) সমোষ্ণ লেখ অপেক্ষাকৃত কম খাড়া।

কাজ : গ্যাস প্রসারণে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ সমচাপ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ অপেক্ষা বৃহত্তর—ব্যাখ্যা কর।

কোনো সিস্টেমে গ্যাসের ক্ষুদ্র প্রসারণ dV এবং স্থির চাপ P হলে সমচাপ প্রক্রিয়ায় গ্যাস কর্তৃক কৃত মোট কাজ $dW = PdV$ = চাপ × আয়তনের পরিবর্তন। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র হতে আমরা জানি, $dQ = du + dW$, অর্থাৎ সমচাপ প্রক্রিয়ায় সরবরাহকৃত তাপশক্তি সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তি পরিবর্তনে এবং বহিস্থ কাজ সম্পাদনে ব্যয় হয়। কিন্তু সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের তাপমাত্রা স্থির থাকে বলে অন্তস্থ শক্তির কোনো পরিবর্তন হয় না।

অতএব সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় $du = 0$; সুতরাং তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রানুযায়ী $dQ = 0 + dW = dW$। অর্থাৎ সরবরাহকৃত তাপশক্তি সম্পূর্ণরূপে কাজ সম্পাদনে ব্যয় হয়। তাই সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ সমচাপ প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ অপেক্ষা বেশি।

গাণিতিক উদাহরণ ১.৩

১। একটি সিলিন্ডারে 300 K তাপমাত্রায় এবং 4 বায়ুমণ্ডলীয় চাপে 10 লিটার গ্যাস আবদ্ধ আছে। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় চাপ দ্বিগুণ করা হলে সিলিন্ডারে গ্যাসের আয়তন কত হবে ?

আমরা জানি,

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

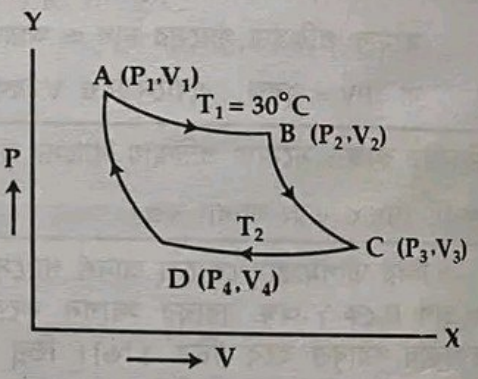
$$\therefore \quad V_2 = \frac{P_1V_1}{P_2} = \frac{4 \times 10}{8} = 5\ L$$

এখানে,
প্রাথমিক চাপ, $P_1 = 4$ atm
প্রাথমিক আয়তন, $V_1 = 10$ L
পরিবর্তিত চাপ, $P_2 = 2 \times 4 = 8$ atm
$V_2 = ?$

২। কার্নো ইঞ্জিনের প্রতি স্তরে সংকোচন ও প্রসারণের অনুপাত 1 : 2। এতে কার্যনির্বাহক বস্তু হিসেবে 3 mol দ্বিপারমাণবিক গ্যাস ব্যবহার করা হলো। ($\gamma = 1.41$)

চক্রটির লেখ অনুযায়ী A হতে B বিন্দুতে আনতে কৃত কাজ হিসাব কর।

কার্নো চক্রের P—V লেখটিতে A হতে B বিন্দুতে গ্যাসটি সমোষ্ণ-ভাবে প্রসারিত হয়। এক্ষেত্রে A বিন্দুতে গ্যাসটির চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_1, V_1 এবং B বিন্দুতে গ্যাসটির চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_2, V_2। এক্ষেত্রে গ্যাস T_1 তাপমাত্রায় উৎস হতে তাপ শোষণ করে এবং তাপ সবটুকু কাজে পরিণত করে। প্রশ্নমতে $V_1 = V$ হলে $V_2 = 2V$।



আমরা জানি, $PV = nRT$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$\therefore \text{ কৃত কাজ, } W = \int PdV$$

$$\text{বা, } \quad W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT_1}{V}\, dV$$

$$= nRT_1 \left[\ln V\right]_{V_1}^{V_2} = nRT_1 \ln (V_2 - V_1) = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$= 3 \times 8.31 \times (30 + 273) \ln \frac{2V}{V}$$

$$= 7553.8 \ln 2 = 5236\ J$$

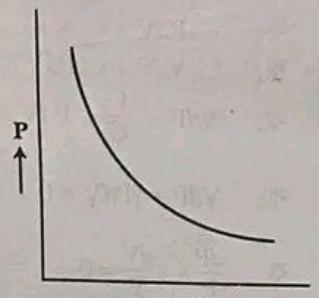
১.৩.২ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন
Adiabatic change

কোনো গ্যাসকে হঠাৎ চাপ দিয়ে সঙ্কুচিত করলে কিছু পরিমাণ তাপ উৎপন্ন হয়। যদি এই উৎপন্ন তাপ অপসারণ করা না হয়, তবে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পাবে। আবার কোনো গ্যাসকে হঠাৎ প্রসারিত হতে দিলে গ্যাসটি কিছু পরিমাণ তাপ হারাবে এবং বাইরে থেকে যদি সমপরিমাণ তাপ সরবরাহ করা না হয়, তবে গ্যাসের তাপমাত্রা হ্রাস পাবে। সুতরাং এই পরিবর্তনে তাপমাত্রা কখনও স্থির থাকে না। আরও উল্লেখ থাকে যে, এই ক্ষেত্রে গ্যাস তাপ গ্রহণ বা বর্জন করে না বটে, তবে গ্যাসের **অন্তর্নিহিত শক্তি** স্থির থাকে না— অন্তর্নিহিত শক্তির হ্রাস-বৃদ্ধি ঘটে। এরূপ পরিবর্তনকে **রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন** বলা হয়। 'a' অর্থ 'না', 'dia' অর্থ 'বরাবর' এবং 'bates' অর্থ 'তাপ'। এক কথায় 'adiabatic'—

অর্থ 'heat not passing through' অর্থাৎ তাপ সিস্টেমে প্রবেশ করে না বা সিস্টেম তাপ ত্যাগ করে না। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে PV^{γ} = ধ্রুবক সমীকরণ এবং $TV^{\gamma-1}$ = ধ্রুবক সমীকরণ প্রযোজ্য।

যে প্রক্রিয়ায় সিস্টেম তাপ গ্রহণ করে না কিংবা তাপ বর্জন করে না তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। যে পরিবর্তনে কোনো তাপ বাহির হতে সরবরাহ করা হয় না বা গ্যাস হতে অপসারণ করা হয় না অথচ গ্যাসের চাপ এবং আয়তনের পরিবর্তন ঘটে তাকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলা হয়।

অথবা, যে প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তন পরিবর্তনকালে তাপের পরিমাণ পরিবর্তন হয় না অর্থাৎ সিস্টেম (প্রক্রিয়াধীন গ্যাস) তাপ গ্রহণ বা বর্জন করে না, কিন্তু তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটে তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। এ পরিবর্তনকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলে।



চিত্র ১.৭

গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে বয়েলের সূত্র প্রযোজ্য নয়। এক্ষেত্রে গ্যাসের চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক হচ্ছে, PV^{γ} = ধ্রুবক এবং তাপমাত্রা ও আয়তনের সম্পর্ক হলো $TV^{\gamma-1}$ ধ্রুবক। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে P এবং V-এর লেখকে রুদ্ধতাপীয় লেখ (adiabatic curve) বলে। চিত্র ১.৭-এ একটি রুদ্ধতাপীয় লেখ দেখানো হয়েছে। রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ-এর তুলনায় বেশি খাড়া হয়।

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের শর্তসমূহ
Conditions for adiabatic change

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের জন্য নিম্নলিখিত শর্তসমূহ প্রয়োজন :

(ক) গ্যাসকে একটি কুপরিবাহী পাত্রে রাখতে হবে।
(খ) পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা কম হতে হবে।
(গ) চাপ পরিবর্তন খুব দ্রুত সংঘটিত করতে হবে যাতে বাইরের সাথে তাপ আদান-প্রদানের কোনো সুযোগ না থাকে।

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের বৈশিষ্ট্য
Characteristics of adiabatic change

১। মোট তাপের পরিমাণ স্থির রেখে কোনো গ্যাসের চাপ ও আয়তনের পরিবর্তনকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলে।
২। এই পরিবর্তনে তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটে।
৩। এটি একটি অতি দ্রুত প্রক্রিয়া।
৪। এই পরিবর্তনে পাত্রটি তাপ কুপরিবাহী হওয়া প্রয়োজন।
৫। এই পরিবর্তনে পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা নিম্ন হতে হয়।
৬। আদর্শ গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের সমীকরণ হলো, PV^{γ} = ধ্রুবক।
৭। রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ হতে অধিক খাড়া।

১.৩.৩ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনে চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক
Relation between pressure and volume of a gas in adiabatic change

মনে করি একটি পাত্রে এক মোল আদর্শ গ্যাস আছে। এই গ্যাসে dQ পরিমাণ তাপ প্রয়োগ করি। এতে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পাবে এবং সেই সঙ্গে গ্যাস কিছু কাজ করবে অর্থাৎ প্রদত্ত তাপ দুইভাবে ব্যয়িত হবে।

ধরি আয়তনের পরিবর্তন dV এবং তাপমাত্রার পরিবর্তন dT.

∴ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র হতে পাই,

$$dQ = C_V dT + PdV \qquad \ldots \quad (1.8)$$

এখানে, C_V = স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ এবং PdV = নির্দিষ্ট চাপে গ্যাসের প্রসারণের জন্য কৃত কাজের পরিমাণ।

আমরা জানি, রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বাইরের সাথে গ্যাসের তাপের কোনো আদান-প্রদান ঘটে না।

অতএব, $dQ = 0$

∴ সমীকরণ (1.8) হতে পাই,

$$C_V dT + PdV = 0 \qquad \ldots \quad (1.9)$$

পুনঃ, আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে, $PV = RT$, এখানে R মোলার গ্যাস ধ্রুবক।

উক্ত সমীকরণকে ব্যবকলন করে পাই,

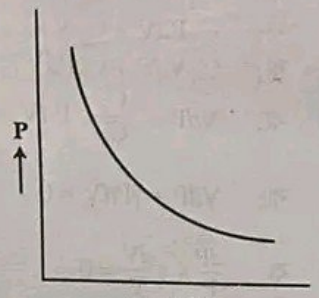
$$PdV + VdP = RdT$$

বা, $$dT = \frac{PdV + VdP}{R}$$

অর্থ 'heat not passing through' অর্থাৎ তাপ সিস্টেমে প্রবেশ করে না বা সিস্টেম তাপ ত্যাগ করে না। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে PV^{γ} = ধ্রুবক সমীকরণ এবং $TV^{\gamma-1}$ = ধ্রুবক সমীকরণ প্রযোজ্য।

যে প্রক্রিয়ায় সিস্টেম তাপ গ্রহণ করে না কিংবা তাপ বর্জন করে না তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। যে পরিবর্তনে কোনো তাপ বাহির হতে সরবরাহ করা হয় না বা গ্যাস হতে অপসারণ করা হয় না অথচ গ্যাসের চাপ এবং আয়তনের পরিবর্তন ঘটে তাকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলা হয়।

অথবা, যে প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তন পরিবর্তনকালে তাপের পরিমাণ পরিবর্তন হয় না অর্থাৎ সিস্টেম (প্রক্রিয়াধীন গ্যাস) তাপ গ্রহণ বা বর্জন করে না, কিন্তু তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটে তাকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া বলে। এ পরিবর্তনকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলে।



চিত্র ১.৭

গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে বয়েলের সূত্র প্রযোজ্য নয়। এক্ষেত্রে গ্যাসের চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক হচ্ছে, PV^{γ} = ধ্রুবক এবং তাপমাত্রা ও আয়তনের সম্পর্ক হলো $TV^{\gamma-1}$ ধ্রুবক। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে P এবং V-এর লেখকে রুদ্ধতাপীয় লেখ (adiabatic curve) বলে। চিত্র ১.৭-এ একটি রুদ্ধতাপীয় লেখ দেখানো হয়েছে। রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ-এর তুলনায় বেশি খাড়া হয়।

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের শর্তসমূহ
Conditions for adiabatic change

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের জন্য নিম্নলিখিত শর্তসমূহ প্রয়োজন :

(ক) গ্যাসকে একটি কুপরিবাহী পাত্রে রাখতে হবে।

(খ) পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা কম হতে হবে।

(গ) চাপ পরিবর্তন খুব দ্রুত সংঘটিত করতে হবে যাতে বাইরের সাথে তাপ আদান-প্রদানের কোনো সুযোগ না থাকে।

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের বৈশিষ্ট্য
Characteristics of adiabatic change

(১) মোট তাপের পরিমাণ স্থির রেখে কোনো গ্যাসের চাপ ও আয়তনের পরিবর্তনকে রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন বলে।
(২) এই পরিবর্তনে তাপমাত্রার পরিবর্তন ঘটে।
(৩) এটি একটি অতি দ্রুত প্রক্রিয়া।
(৪) এই পরিবর্তনে পাত্রটি তাপ কুপরিবাহী হওয়া প্রয়োজন।
(৫) এই পরিবর্তনে পাত্রের চতুষ্পার্শ্বস্থ মাধ্যমের তাপগ্রাহিতা নিম্ন হতে হয়।
(৬) আদর্শ গ্যাসের রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের সমীকরণ হলো, PV^{γ} = ধ্রুবক।
(৭) রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ হতে অধিক খাড়া।

১.৩.৩ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনে চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক
Relation between pressure and volume of a gas in adiabatic change

মনে করি একটি পাত্রে এক মোল আদর্শ গ্যাস আছে। এই গ্যাসে dQ পরিমাণ তাপ প্রয়োগ করি। এতে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি পাবে এবং সেই সঙ্গে গ্যাস কিছু কাজ করবে অর্থাৎ প্রদত্ত তাপ দুইভাবে ব্যয়িত হবে।

ধরি আয়তনের পরিবর্তন dV এবং তাপমাত্রার পরিবর্তন dT.

∴ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র হতে পাই,

$$dQ = C_V dT + PdV \qquad \ldots \quad (1.8)$$

এখানে, C_V = স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ এবং PdV = নির্দিষ্ট চাপে গ্যাসের প্রসারণের জন্য কৃত কাজের পরিমাণ।

আমরা জানি, রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বাইরের সাথে গ্যাসের তাপের কোনো আদান-প্রদান ঘটে না।

অতএব, $dQ = 0$

∴ সমীকরণ (1.8) হতে পাই,

$$C_V dT + PdV = 0 \qquad \ldots \quad (1.9)$$

পুনঃ, আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে, $PV = RT$, এখানে R মোলার গ্যাস ধ্রুবক।

উক্ত সমীকরণকে ব্যবকলন করে পাই,

$$PdV + VdP = RdT$$

বা, $$dT = \frac{PdV + VdP}{R}$$

∴ সমীকরণ (1.8) হতে পাই,

$$C_V\left(\frac{PdV + VdP}{R}\right) + PdV = 0$$

বা, $C_VPdV + C_VVdP + RPdV = 0$

বা, $C_VPdV + C_VVdP + (C_P - C_V)PdV = 0$ $[\because R = C_P - C_V]$

বা, $C_VPdV + C_VVdP + C_PPdV - C_VPdV = 0$

বা, $C_VVdP + C_PPdV = 0$

বা, $VdP + \frac{C_P}{C_V}PdV = 0$ [C_V দ্বারা ভাগ করে]

বা, $VdP + \gamma PdV = 0$ $\left[\because \frac{C_P}{C_V} = \gamma\right]$

বা, $\frac{dP}{P} + \gamma\frac{dV}{V} = 0$ [PV দ্বারা ভাগ করে]

এখন সমাকলন করে পাই,

$\log_e P + \gamma \log_e V =$ ধ্রুবক $= \log_e K$, এখানে K = ধ্রুবক।

বা, $\log_e P + \log_e V^\gamma = \log_e K$

বা, $\log_e PV^\gamma = \log_e K$

∴ $PV^\gamma = K =$ ধ্রুবক ... ... (1.10)

এটিই হলো চাপ ও আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক।

যদি আদি চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_1 ও V_1 এবং চূড়ান্ত চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_2 ও V_2 হয়, তাহলে

$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma =$ ধ্রুবক ... ... (1.11)

১.৩.৪ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনে আয়তন ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক

Relation between volume and temperature in adiabatic change

আমরা জানি, আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে, $PV = RT$

∴ $P = \frac{RT}{V}$

পুনঃ, আমরা পাই, $PV^\gamma =$ ধ্রুবক।

উক্ত সমীকরণে P-এর মান বসিয়ে পাই,

$\frac{RT}{V} \times V^\gamma =$ ধ্রুবক বা, $RTV^{\gamma-1} =$ ধ্রুবক

বা, $T \times V^{\gamma-1} =$ ধ্রুবক $[\because R =$ ধ্রুবক$]$

এটিই হলো রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আয়তন ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক।

১.৩.৫ রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনে আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে চাপ ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক

Relation between pressure and temperature in adiabatic process in case of an ideal gas

আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে এক মোল গ্যাসের জন্য আমরা জানি,

$PV = RT$

বা, $V = \frac{RT}{P}$

রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে $PV^\gamma =$ ধ্রুবক।

V-এর মান বসিয়ে পাই,

$$P\left(\frac{RT}{P}\right)^\gamma = \text{ধ্রুবক}$$

বা, $P \times R^\gamma \times T^\gamma \times P^{-\gamma} =$ ধ্রুবক

বা, $P^{1-\gamma} \times T^\gamma = \frac{\text{ধ্রুবক}}{R^\gamma}$

বা, $T^\gamma P^{1-\gamma} =$ ধ্রুবক

এই সমীকরণের উভয় পাশে γ মূল দিয়ে ভাগ করে পাই,

$\therefore \quad TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} =$ ধ্রুবক

ইহাই রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে চাপ ও তাপমাত্রার মধ্যে সম্পর্ক।

হিসাব : রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় ($\gamma = 1{\cdot}4$) দ্বি-পরমাণু গ্যাসের চাপ 0·5% বৃদ্ধি করা হলে গ্যাসের আয়তন কত কমবে ?

$P_1V_1^{\gamma} = PV^{\gamma}$ সম্পর্ক ব্যবহার করে পাই,

$$\left(\frac{V_1}{V}\right)^{\gamma} = \left(\frac{P}{P_1}\right)$$

$$\left(\frac{V_1}{V}\right) = \left(\frac{P}{P_1}\right)^{1/\gamma}$$

বা, $V_1 = V \times \left(\frac{P}{P_1}\right)^{1/\gamma}$

বা, $V_1 = V \times \left(\frac{P}{P + 0{\cdot}5\% \times P}\right)^{1/\gamma}$

বা, $V_1 = V \times \left(\frac{P}{P\,(1 + 0{\cdot}5\%)}\right)^{1/\gamma}$

$\therefore \quad V_1 = V \times 0{\cdot}9964413 \simeq V \times 0{\cdot}9964$

$\therefore$ আয়তন কমার পরিমাণ $= \frac{V_1 - V}{V} \times 100\%$

$$= \frac{V \times 0{\cdot}9964 - V}{V} \times 100\% = -0{\cdot}36\%$$

কাজ : রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে সংনমিত করলে এর তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়—এর কারণ কী ?

রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে সংনমিত করলে তাপমাত্রা বেড়ে যায় এবং প্রসারিত করলে তাপমাত্রা কমে যায়। অর্থাৎ রুদ্ধতাপীয় গ্যাস কোনো তাপ গ্রহণ বা বর্জন না করলেও গ্যাসের অন্তস্থ শক্তি স্থির থাকে না। যখন গ্যাসকে সংনমিত করা হয় তখন গ্যাসের ওপর কাজ সম্পাদিত হয়। এতে গ্যাসের শক্তি বৃদ্ধি পায়। অর্থাৎ গ্যাসের অন্তস্থ শক্তির বৃদ্ধি ঘটে। কারণ এক্ষেত্রে গ্যাস তাপ বর্জন করতে পারে না। তাই এই রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় গ্যাসকে সংনমিত করলে এর তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়।

গাণিতিক উদাহরণ ১.৪

১। 25°C তাপমাত্রায় ও বায়ুমণ্ডলীয় চাপে আবদ্ধ শুষ্ক বায়ুকে হঠাৎ বা রুদ্ধতাপে সংনমিত করে আয়তন অর্ধেক করা হলো। চূড়ান্ত (ক) তাপমাত্রা (খ) চাপ নির্ণয় কর। [$\gamma = 1{\cdot}4$]

[চ. বো. ২০১০; ঢা. বো. ২০০৮; ব. বো. ২০০৪]

মনে করি, চূড়ান্ত তাপমাত্রা $= T_2$ K ও চাপ $= P_2$

আমরা পাই, $T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$ ... (i)

$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$ ... (ii)

(ক) সমীকরণ (i) হতে পাই,

$$T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = 2^{1{\cdot}4-1} \times 298 \text{ K}$$

$= 393{\cdot}21$ K $= (393{\cdot}21 - 273)$°C $= 120{\cdot}21$°C

এখানে,

$T_1 = 25$°C $= (25 + 273)$ K $= 298$ K

প্রাথমিক আয়তন $= V_1$

চূড়ান্ত আয়তন, $V_2 = \frac{1}{2}V_1$

$\gamma = 1{\cdot}4$

প্রাথমিক চাপ, $P_1 = 1$ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ

চূড়ান্ত চাপ, $P_2 = ?$

(খ) $P_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} \times P_1$

$= 2^{1.4} \times 1$ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ

$= 2.64$ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ

২। 100°C তাপমাত্রার বায়ুকে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় সংকুচিত করে এর অর্ধেক আয়তনে পরিণত করা হলো। তাপমাত্রার পরিবর্তন নির্ণয় কর। [KUET Admission Test, 2005-06]

আমরা জানি, রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায়,

$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$

বা, $T_2 = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = 373\left(\frac{1}{1/2}\right)^{1.4-1}$

$= 373(2)^{1.4-1} = 492.176$ K

∴ তাপমাত্রার পরিবর্তন, $\Delta T = 492.176 - 373 = 119.176$ K

$= 119.176°$ C

৩। বায়ুকে রুদ্ধতাপে প্রসারিত করে এর আয়তন তিনগুণ করা হলো। যদি প্রাথমিক চাপ 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপ হয় তাহলে চূড়ান্ত চাপ কত হবে ? [$\gamma = 1.4$] [রা. বো. ২০০৯; ব. বো. ২০০৫; ঢা. বো. ২০০৪]

আমরা জানি,

$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$

$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)$

বা, $\left(\frac{3V_1}{V_1}\right)^{\gamma} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)$

∴ $(3)^{1.4} = \frac{1.013 \times 10^5}{P_2}$

বা, $P_2 = \frac{1.013 \times 10^5}{(3)^{1.4}}$

$= 2.176 \times 10^4$ Nm^{-2}

এখানে,

প্রাথমিক চাপ = 1 বায়ুমণ্ডলীয় চাপ, $P_1 = 0.76$ m পারদ

স্তম্ভের চাপ $= 0.76\text{ m} \times (13.6 \times 10^3\text{ kgm}^{-3}) \times 9.8\text{ ms}^{-2}$

$= 1.013 \times 10^5$ Nm^{-2}

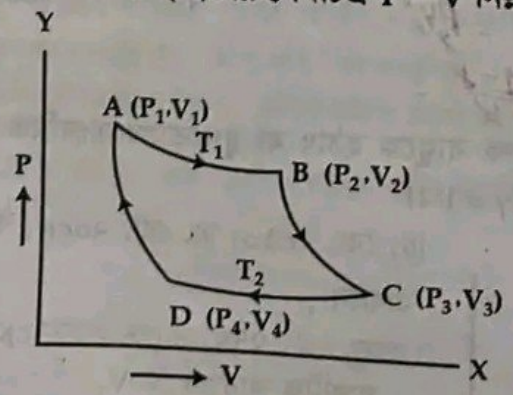
প্রাথমিক আয়তন $= V_1$

চূড়ান্ত আয়তন, $V_2 = 3V_1$

$\gamma = 1.4$

চূড়ান্ত চাপ, $P_2 = ?$

৪। একটি কার্নো ইঞ্জিনের লেখচিত্র P — V নিম্নরূপ :



এখানে,

$P_1 = 3$ atm

$T_1 = 600$ K

$V_1 = 2 \times 10^{-3}$ m^3

$V_2 = 6 \times 10^{-3}$ m^3

$T_2 = 300$ K

কার্নো চক্রটির B বিন্দুতে চাপ এবং C বিন্দুতে আয়তন কত হবে ?

আমরা জানি, কার্নো চক্রে A থেকে B তে সমোষ্ণ প্রসারণ এবং B থেকে C তে রুদ্ধতাপীয় প্রসারণ ঘটে। সমোষ্ণ প্রসারণের ক্ষেত্রে B বিন্দুতে চাপ,

$P_1V_1 = P_2V_2$

∴ $P_2 = \frac{P_1V_1}{V_2} = \frac{3 \times 2 \times 10^{-3}}{6 \times 10^{-3}} = 1$ atm

রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে C বিন্দুতে আয়তন,

$T_1V_2^{\gamma-1} = T_2V_3^{\gamma-1}$

বা, $600 \times (2 \times 10^{-3})^{1\cdot41-1} = 300\ V_3^{\gamma-1}$

বা, $2 \times (2 \times 10^{-3})^{0\cdot41} = V_3^{1\cdot41-1}$

বা, $V_3^{0\cdot41} = 2 \times (2 \times 10^{-3})^{0\cdot41}$

বা, $V_3 = 2^{\frac{1}{0\cdot41}} \times (2 \times 10^{-3}) = 0\cdot010845\ m^3$

৫। একটি সিলিন্ডারে 300 K তাপমাত্রায় ও 10^6 Pa চাপে $0\cdot001\ m^3$ গ্যাস আছে। গ্যাসটিকে প্রথমে সমোষ্ণ প্রসারণ করা হলো এবং পরে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় আবারও প্রসারণ করা হলো, প্রতিক্ষেত্রেই প্রসারণের অনুপাত 1 : 2। প্রসারণে মোট কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর। [BUET Admission Test, 2017–18]

সমোষ্ণ প্রসারণের ক্ষেত্রে কৃত কাজ,

$$W_1 = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$= 8\cdot4 \times 300 \times \ln\left(\frac{2}{1}\right) = 1746\cdot73\ J$$

রুদ্ধতাপীয় প্রসারণের ক্ষেত্রে,

$T_1V_1^{\gamma-1} = T_2V_2^{\gamma-1}$

$$T_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \times T_1 = \left(\frac{1}{2}\right)^{1\cdot4-1} \times 300 = 227\cdot36\ K$$

এখানে, প্রসারণের অনুপাত 1 : 2 অর্থাৎ $\frac{V_1}{V_1} = \frac{1}{2}$

কৃত কাজ, $W_2 = \left(\frac{nR}{1-\gamma}\right)(T_2 - T_1)$

$$= \left(\frac{8\cdot4}{1-1\cdot4}\right)(227\cdot36 - 300) = 1525\cdot44\ J$$

∴ মোট কাজ, $W = W_1 + W_2 = 1746\cdot73 + 1525\cdot44$

$= 3272\cdot17\ J$

১৪ মোলার আপেক্ষিক তাপ বা মোলার তাপধারণ ক্ষমতা
Molar specific heat or molar heat capacity

আমরা জানি, বস্তু অতি ক্ষুদ্র অণু, পরমাণু সমন্বয়ে গঠিত এবং একটি বস্তুর মধ্যে অণু-পরমাণুর সংখ্যা অত্যন্ত বেশি। যেমন মাত্র 12 gm কার্বনের মধ্যে $6\cdot02 \times 10^{23}$ টি পরমাণু থাকে। এত বড় সংখ্যাকে ছোট এককে প্রকাশ করা হয়। এই ছোট এককে গ্রাম-মোল (gm-mole) বা সংক্ষেপে মোল (mole) বলে।[১] গ্যাসের ক্ষেত্রে আপেক্ষিক তাপ সংজ্ঞায়িত করার জন্য g বা kg ব্যবহার না করে মোল ব্যবহার করা হয় এবং সংশ্লিষ্ট আপেক্ষিক তাপকে মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে।

সংজ্ঞা : 1 মোল গ্যাসের তাপমাত্রা 1 ডিগ্রি বাড়াতে যে পরিমাণ তাপের প্রয়োজন হয় তাকে ওই গ্যাসের মোলার তাপধারণ ক্ষমতা বা মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে। একে C দ্বারা প্রকাশ করা হয়।

কোনো গ্যাসের n মোলের তাপমাত্রা ΔT বৃদ্ধি করতে যদি ΔQ পরিমাণ তাপের প্রয়োজন হয়, তবে মোলার তাপ ধারণ ক্ষমতা,

$$C = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.12)$$

একক : ΔQ এর একক জুল (joule), n-এর একক মোল (mole) এবং ΔT-এর একক কেলভিন (K)। সুতরাং সমীকরণ (1.12) হতে C-এর একক $J(mol)^{-1}\ K^{-1}$।

গ্যাসের দুটি আপেক্ষিক তাপ রয়েছে। সুতরাং এর দুটি মোলার আপেক্ষিক তাপও রয়েছে। যথা—(i) স্থির চাপে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ এবং (ii) স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ।

---

১ কোনো বস্তুর পারমাণবিক বা আণবিক ওজন (atomic weight) কিলোগ্রামে প্রকাশ করলে তাকে 1 মোল বলা হয়।

(i) স্থির চাপে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ C_P :

স্থির চাপে 1 mole গ্যাসের তাপমাত্রা 1K বৃদ্ধি করতে যে তাপের প্রয়োজন তাকে স্থির চাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে। একে C_P দ্বারা প্রকাশ করা হয়। চাপ স্থির রেখে n মোল গ্যাসের তাপমাত্রা ΔT বাড়াতে যদি ΔQ জুল তাপের প্রয়োজন হয়, তবে সংজ্ঞানুসারে,

$$C_P = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (1.13)$$

(ii) স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ, C_V :

স্থির আয়তনে 1 mole গ্যাসের তাপমাত্রা 1K বৃদ্ধি করতে যে তাপের প্রয়োজন তাকে স্থির আয়তনে মোলার আপেক্ষিক তাপ বলে। একে C_V দ্বারা প্রকাশ করা হয়।

আয়তন স্থির রেখে m মোল গ্যাসের তাপমাত্রা ΔT বাড়াতে যদি ΔQ তাপের প্রয়োজন হয়, তবে সংজ্ঞানুসারে,

$$C_V = \frac{\Delta Q}{n\Delta T} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (1.14)$$

পরীক্ষায় দেখা গেছে C_P এর মান C_V অপেক্ষা বেশি হয়। এর ভৌত কারণ পরবর্তী অনুচ্ছেদে আলোচনা করা হলো।

১.৪.১ C_P এবং C_V-এর পার্থক্যের ভৌত ব্যাখ্যা ($C_P > C_V$-এর কারণ)

Physical explanation of the difference between C_P and C_V

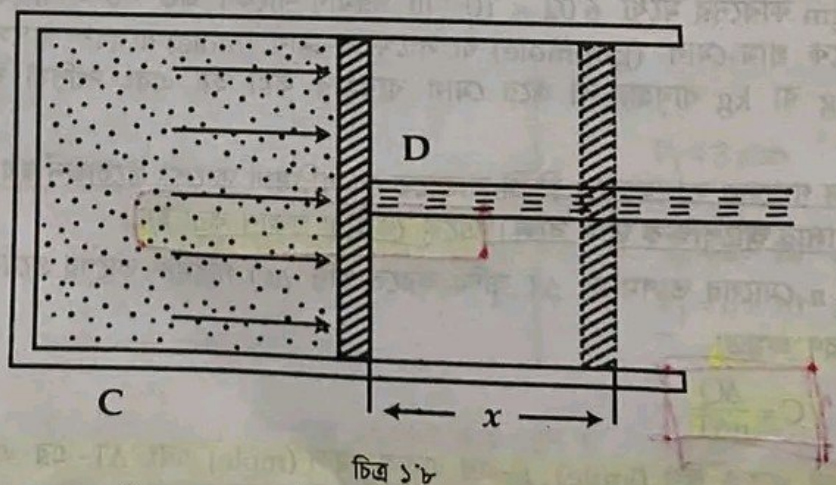
একটি নির্দিষ্ট ভরের কোনো গ্যাসের আয়তন স্থির রেখে তাকে উত্তপ্ত করতে থাকলে তার চাপ ও তাপমাত্রা উভয়ই বৃদ্ধি পায়। কিন্তু আয়তন স্থির থাকায় ওই গ্যাস বাহ্যিক কোনো কাজ করে না। ফলে সম্পূর্ণ তাপ গ্যাসের চাপ ও তাপমাত্রা পরিবর্তনেই ব্যয় হয়। আবার চাপ স্থির রেখে গ্যাসটিকে উত্তপ্ত করতে থাকলে তার আয়তন ও তাপমাত্রা উভয়ই বৃদ্ধি পায়। ফলে প্রযুক্ত তাপ একদিকে গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধি করে এবং অপরদিকে বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে গ্যাসের আয়তন বৃদ্ধি করে কিছু কাজ সম্পন্ন করে। সুতরাং স্থির অয়তনে 1 মোল গ্যাসের তাপমাত্রা 1K পর্যন্ত বৃদ্ধি করতে যে তাপের প্রয়োজন হবে স্থির চাপে ওই গ্যাসের তাপমাত্রা 1K বৃদ্ধি করতে তা অপেক্ষা কিছু বেশি তাপের প্রয়োজন হবে। কেননা দ্বিতীয় ক্ষেত্রে বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে কাজ করে আয়তন বৃদ্ধি করতে কিছু অতিরিক্ত তাপ লাগবে। অর্থাৎ $C_P = C_V$ + বাহ্যিক চাপের বিরুদ্ধে কাজের সমতুল তাপ। সুতরাং $C_P > C_V$।

১.৪.২ একটি আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে C_P ও C_V-এর মধ্যে পার্থক্য

Difference between C_P and C_V for an ideal gas

আমরা জানি গ্যাসের দুটি আপেক্ষিক তাপ আছে, একটি C_P এবং অপরটি C_V। এদের মধ্যে পার্থক্য বের করতে হবে।

একটি আদর্শ গ্যাসের দুই আপেক্ষিক তাপের মধ্যে পার্থক্য করতে গিয়ে তাপ কুপরিবাহী পদার্থের একটি আবদ্ধ চোঙ লই। মনে করি চোঙ C। চোঙের মধ্যে একটি হালকা ঘর্ষণশূন্য ও বায়ুনিরুদ্ধ পিস্টন বিনা বাধায় চলাচল করতে পারে। মনে করি পিস্টনটি D। পিস্টনটিও কুপরিবাহী পদার্থের তৈরি।



চিত্র ১.৮

এই আবদ্ধ চোঙে 1 মোল পরিমাণ গ্যাস লই। এখন গ্যাসটির আয়তন স্থির রেখে এর তাপমাত্রা dT পরিমাণ বৃদ্ধি করি। যদি স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ C_V হয়, তবে গ্যাস কর্তৃক গৃহীত তাপ

= ভর × আপেক্ষিক তাপ × তাপমাত্রার পার্থক্য

$= 1 \times C_V \times dT$

গ্যাসের তাপমাত্রা বৃদ্ধির পরিমাণ এক কেলভিন হলে গ্যাস কর্তৃক গৃহীত তাপ

$= C_V \times 1$

$= C_V$ জুল (J)

মনে করি স্থির চাপে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ C_P অর্থাৎ স্থির চাপে 1 মোল গ্যসের তাপমাত্রা 1 ডিগ্রি বাড়াতে C_P পরিমাণ তাপের প্রয়োজন হবে। গ্যাসে সরবরাহকৃত এই তাপ দুই ভাগে ব্যয়িত হবে। এর একটি অংশ C_V গ্যাসের তাপমাত্রা বাড়াবে এবং অপর অংশ বাহ্যিক চাপ P-এর বিরুদ্ধে গ্যাসের আয়তন বৃদ্ধিতে কাজ করবে। ধরি চাপের বিরুদ্ধে গ্যাসের আয়তন বৃদ্ধির ফলে পিস্টনটি x পরিমাণ দূরত্ব বাইরে সরে গেল। অতএব কাজের পরিমাণ

$=$ বল $\times$ সরণ

$=$ চাপ $\times$ ক্ষেত্রফল $\times$ সরণ [$\because$ বল = চাপ $\times$ আয়তন]

$= P \times A \times x$; এখানে A = পিস্টন বা চোঙের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল

$\therefore$ কাজ $= P.\,dV$ জুল (J); এখানে dV = গ্যাসের প্রসারিত আয়তন $= A.x$

অতএব,

$C_P = C_V +$ কাজের পরিমাণ

বা, $C_P = C_V + P.\,dV$ ... ... (1.15)

আমরা জানি আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে

$PV = RT$ ... ... (1.16)

যদি চাপ স্থির থাকে, তবে সমীকরণ (1.16)-কে ব্যবকলন করে পাই,

$P\,dV + V dP = R dT + T dR$

$P\,dV + V \times 0 = R\,dT + T \times 0$ [$\because$ স্থির চাপে $dP = 0$ এবং R ধ্রুব রাশি হওয়ায়, $dR = 0$ এবং তাপমাত্রা বৃদ্ধি $dT = 1$ K]

বা, $P\,dV = R\,dT = R$

$\therefore$ সমীকরণ (1.14) হতে পাই,

$C_P = C_V + R$

বা, $C_P - C_V = R$ ... ... (1.17)

অর্থাৎ **গ্যাসের দুই আপেক্ষিক তাপের পার্থক্য বা অন্তরফল গ্যাস ধ্রুবক R-এর সমান।**

যেহেতু R ধনাত্মক, সুতরাং $C_p > C_V$। অর্থাৎ স্থির চাপে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ স্থির আয়তনে গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ অপেক্ষা বড়। R-এর মান $8{\cdot}314$ J K^{-1} mol^{-1} বসিয়ে সমীকরণ (1.17) হতে পাওয়া যায়, $C_P - C_V = 8{\cdot}314$ J K^{-1} mol

সমীকরণ (1.16) থেকে পাই, $\frac{C_P}{C_V} - 1 = \frac{R}{C_V}$

বা, $\gamma - 1 = \frac{R}{C_V}$ $\left(\because \frac{C_P}{C_V} = \gamma\right)$

বা, $C_V = \frac{R}{\gamma - 1}$ ... ... [1.17(a)]

১.৪.৩ γ-এর মানের ভিন্নতা ও গুরুত্ব
Variation in the value of γ and its importance

γ-এর মানের ভিন্নতা :

আমরা জানি,

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\text{স্থির চাপে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ}}{\text{স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ}}$$

এক পারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে

$$C_V = \frac{3}{2}R \text{ এবং}$$

$$C_P = C_V + R = \frac{3}{2}R + R = \frac{5}{2}R$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\frac{5}{2}R}{\frac{3}{2}R} = 1{\cdot}67, \text{ অর্থাৎ এক পারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে } \gamma = 1{\cdot}67$$

দ্বিপারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে

$$C_V = \frac{5}{2}R \text{ এবং}$$

$$C_P = C_V + R = \frac{5}{2}R + R = \frac{7}{2}R$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{\frac{7}{2}R}{\frac{5}{2}R} = \frac{7}{5}R = 1{\cdot}40, \text{ অর্থাৎ দ্বিপারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে } \gamma = 1{\cdot}40$$

বহুপারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে

$$C_V = 3R \text{ এবং}$$

$$C_P = 3R + R = 4R$$

$$\therefore \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{4R}{3R} = \frac{4}{3} = 1{\cdot}33$$

পরীক্ষালব্ধ ফলাফল হতে দেখা যায় যে, সকল এক পরমাণুক গ্যাসের ক্ষেত্রে [যেমন He, Ne, Ar] γ-এর মান 1·67। সকল দ্বিপরমাণুক গ্যাসের ক্ষেত্রে [যেমন H_2, O_2, N_2, Cl_2] γ-এর মান 1·40 এবং সকল ত্রিপরমাণুক গ্যাসের ক্ষেত্রে [যেমন CO_2, C_2H_6, NH_3] γ-এর মান 1·33। অতএব একই প্রকার আণবিক গঠনের জন্য γ-এর মান নির্দিষ্ট এবং বিভিন্ন গঠনের গ্যাসের জন্য γ-এর মান ভিন্ন ভিন্ন হয়।

γ-এর গুরুত্ব :

(ক) কোনো গ্যাসের γ-এর মান জানা থাকলে ওই গ্যাসের আণবিক বিন্যাস জানা যায় অর্থাৎ ওই গ্যাসের প্রতিটি অণুর মধ্যে কয়টি পরমাণু আছে তা জানা যায়।

(খ) গ্যাসীয় মাধ্যমে শব্দের বেগ γ–এর মানের ওপর নির্ভর করে। তাই শব্দের বেগ নির্ণয়ের জন্য এর প্রয়োজন হয়।

(গ) গ্যাসের রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়া পর্যালোচনার জন্য γ-এর মান জানা দরকার।

গাণিতিক উদাহরণ ১.৫

১। বহুপারমাণবিক গ্যাসের জন্য স্থির আয়তনে ও স্থির চাপে মোলার আপেক্ষিক তাপ নির্ণয় কর।

[$\gamma = 1{\cdot}33$, $R = 8{\cdot}31\ J\ mol^{-1}K^{-1}$]

আমরা জানি,

$$C_P - C_V = R \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(i)}$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

$$\therefore \quad C_P = \gamma C_V$$

সমীকরণ (i)-এ C_P এর মান বসিয়ে পাই,

$$C_V(\gamma - 1) = R$$

$$C_V = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{8{\cdot}31}{1{\cdot}33 - 1}$$

$$= 25{\cdot}18\ J\ mol^{-1}K^{-1}$$

আবার, $C_P = C_V + R$

১.৪.৪ রুদ্ধতাপীয় রেখা (লেখ) সমোষ্ণ রেখা (লেখ)-এর চেয়ে অধিকতর খাড়া
Adiabatic curve is steeper than isothermal curve

P —V লেখচিত্রের সাহায্যে সমোষ্ণ ও রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া নির্দেশ করা যায় [চিত্র ১·৯]। লেখচিত্রের কোনো বিন্দুতে স্পর্শক টানলে ওই বিন্দুতে ঢাল বা নতি হবে $\frac{dP}{dV}$। দেখা যায় যে, যেকোনো বিন্দুতে রুদ্ধতাপ রেখার ঢাল সমোষ্ণ রেখার ঢালের γ গুণ হয়।

সমোষ্ণ ও রুদ্ধতাপীয় সমীকরণদ্বয়কে ব্যবকলন করে সহজেই প্রমাণ করা যায় যে রুদ্ধতাপীয় রেখা সমোষ্ণ রেখা অপেক্ষা γ-গুণ খাড়া।

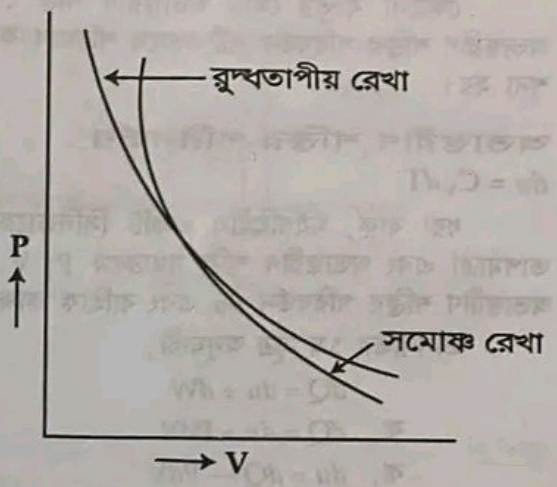
সমোষ্ণ পরিবর্তনের ক্ষেত্রে

PV = ধ্রুবক

উভয় পক্ষকে অবকলন করে পাই,

$$PdV + VdP = 0$$

বা, $$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{সমোষ্ণ}} = -\frac{P}{V} \quad \cdots \quad \cdots \quad (1.18)$$



চিত্র ১·৯

অপরপক্ষে, রুদ্ধতাপ পরিবর্তনের ক্ষেত্রে,

PV^{γ} = ধ্রুবক

উভয় পক্ষকে অবকলন করে পাই,

$$\gamma PV^{\gamma-1}dV + V^{\gamma}dP = 0$$

বা, $$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{রুদ্ধতাপ}} = -\frac{\gamma PV^{\gamma-1}}{V^{\gamma}}$$

$$= -\gamma PV^{\gamma-1}V^{-\gamma}$$

$$= -\gamma PV^{-1} = -\gamma\frac{P}{V} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (1.19)$$

সমীকরণ (1.18) ও (1.19) তুলনা করলে দেখা যায় যে,

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{রুদ্ধতাপ}} = \gamma\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{সমোষ্ণ}}$$

বা, $$\frac{\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{রুদ্ধতাপ}}}{\left(\frac{dP}{dV}\right)_{\text{সমোষ্ণ}}} = \gamma$$

সুতরাং, যে কোনো বিন্দুতে রুদ্ধতাপ রেখার ঢাল ওই বিন্দুতে সমোষ্ণ রেখার ঢাল অপেক্ষা γ গুণ বেশি। যেহেতু যে কোনো গ্যাসের ক্ষেত্রে $\gamma > 1$, সুতরাং রুদ্ধতাপীয় রেখা সমোষ্ণ রেখার চেয়ে γ গুণ খাড়া।

১·৫ অভ্যন্তরীণ শক্তি
Internal energy

একটি গ্যাস ভর্তি বেলুনে হাত দিয়ে চাপ দাও। দেখবে যে, বেলুনটিও ভেতর থেকে তোমার হাতে চাপ দিচ্ছে। বেলুন এই শক্তি পেল কোথা থেকে ? এই শক্তিই অভ্যন্তরীণ শক্তি। উপরোক্ত ধারণা থেকে আমরা বলতে পারি—

প্রত্যেক ব্যবস্থা (system)-এর মধ্যে এমন একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি আছে যা কাজ সম্পাদন করে অন্য শক্তিতে রূপান্তরিত হতে পারে। বস্তুর মধ্যস্থ অণু-পরমাণুর গতিশক্তি এবং এদের মধ্যকার আন্তঃআণবিক বলের কারণে সৃষ্ট শক্তিকে অভ্যন্তরীণ শক্তি বলে। সংক্ষেপে বলা যায় কোনো সিস্টেমের বা বস্তুর মধ্যে যে শক্তি লুক্কায়িত বা সুপ্ত অবস্থায় থাকে যা পরিবেশ পরিস্থিতিতে বহিঃপ্রকাশ ঘটায় তাকে অভ্যন্তরীণ শক্তি বলে।

অভ্যন্তরীণ শক্তি নিম্নোক্ত দুই ধরনের শক্তির যোগফল।

(ক) তাপীয় শক্তি যা এলোমেলোভাবে (randomly) বিচরণশীল অণুগুলোর গতিশক্তি এবং

(খ) আণবিক স্থিতিশক্তি (atomic potential energy)।

অণুর মধ্যে যে সকল পরমাণু থাকে তাদের মধ্যে ক্রিয়াশীল বল এবং আন্তঃআণবিক বলের কারণে আণবিক স্থিতিশক্তির উৎপত্তি হয়।

অতএব মোট অভ্যন্তরীণ অন্তস্থ শক্তি, E = গতিশক্তি (K. E.) + স্থিতিশক্তি (P. E.)

তাপ যা গরম বস্তু থেকে শীতল বস্তুতে প্রবাহিত হয় তা গরম বস্তুর অন্তস্থ শক্তির মধ্যে উৎপন্ন হয়। তাপমাত্রার পার্থক্যের কারণে গরম ও শীতল বস্তুর মধ্যে যখন তাপ প্রবাহিত হয় তখন গরম বস্তুর অন্তস্থ শক্তি কমে। পক্ষান্তরে শীতল বস্তুর অন্তস্থ শক্তি বৃদ্ধি পায়। প্রকৃতপক্ষে গরম বস্তু থেকে শীতল বস্তুতে শক্তি গমনকে নির্দেশ করার জন্য তাপ শব্দটি ব্যবহার করা হয়। এটা বলা সঠিক নয় যে একটি বস্তু তার অভ্যন্তরে তাপ ধারণ করে। বস্তুত একটি বস্তু অভ্যন্তরীণ শক্তি ধারণ করে, তাপ নয়।

কোনো বস্তুর মোট অভ্যন্তরীণ শক্তি কোনোভাবেই পরিমাপ করা সম্ভব নয়। তবে তাপ প্রয়োগে বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন সঠিকভাবে পরিমাপ করা যায়। স্থির তাপে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয় এবং কাজও শূন্য হয়।

অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন

$du = C_V dT$

ধরা যাক, ঘর্ষণবিহীন একটি সিলিন্ডারের মধ্যে m মোল আদর্শ গ্যাস আছে। এই গ্যাসের চাপ, আয়তন, তাপমাত্রা এবং অভ্যন্তরীণ শক্তি যথাক্রমে P, V, T এবং u। এখন এই গ্যাসে dQ পরিমাণ তাপ প্রয়োগ করা হলে অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন du এবং বাহ্যিক কাজ dW হলে,

তাপগতির ১ম সূত্র অনুযায়ী,

$$dQ = du + dW$$

বা, $dQ = du + PdV$

বা, $du = dQ - PdV$

আয়তন স্থির থাকলে, $du = dQ \quad [\because dV = 0]$

$\therefore \quad du = dQ$

এক্ষেত্রে দেখা যায় যে, **স্থির আয়তনে গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির বৃদ্ধি সরবরাহকৃত তাপের সমান।**

স্থির আয়তনে m মোল গ্যাসের dQ পরিমাণ তাপশক্তি সরবরাহ করায় যদি এর তাপমাত্রা dT পরিমাণ বৃদ্ধি পায় তাহলে ওই গ্যাসের মোলার আপেক্ষিক তাপ,

$$C_V = \frac{dQ}{m dT}$$

বা, $dQ = mC_V dT$, 1 মোল গ্যাসের ক্ষেত্রে $m = 1$

$\therefore \quad dQ = C_V dT$। অর্থাৎ dT তাপমাত্রা বৃদ্ধিতে 1 মোল গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির বৃদ্ধি হলো C_V এবং dT এর গুণফলের সমান। এক্ষেত্রে আয়তন স্থির থাকা আবশ্যক নয়। কারণ অভ্যন্তরীণ শক্তি কেবল তাপমাত্রার ওপর নির্ভরশীল।

গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির নির্ভরতা

কোনো গ্যাসের অবস্থা তার চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রা দ্বারা নির্ধারিত হয়। সুতরাং, মনে করা স্বাভাবিক যে গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি এই তিনটি রাশির ওপর নির্ভর করে। প্রকৃতপক্ষে তা নয়। অনেক পরীক্ষা-নিরীক্ষার পর বিজ্ঞানী জুল নিম্নোক্ত সিদ্ধান্তে উপনীত হন—

কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি শুধু এর তাপমাত্রার ওপর নির্ভর করে, এর চাপ বা আয়তনের ওপর নির্ভর করে না। একে মেয়ারের প্রকল্প (Mayer's hypothesis) বলা হয়।

অতএব, তাপমাত্রার পরিবর্তন হতে নির্দিষ্ট পরিমাণ গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন পরিমাপ করা যায়। স্পষ্টত চাপ বা আয়তন পরিবর্তিত হলেও তাপমাত্রা যদি স্থির থাকে তবে গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তিও অপরিবর্তিত থাকবে। অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন কোনো ব্যবস্থার প্রাথমিক ও চূড়ান্ত অবস্থার ওপর নির্ভর করে। কোন পথে চূড়ান্ত অবস্থায় পৌঁছল তার ওপর নির্ভর করে না।

কাজ : কোন প্রক্রিয়ায় অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হবে ?

প্রত্যাবর্তী বা আবর্ত প্রক্রিয়ায় যেহেতু বস্তু প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে তাই কার্যরত বস্তুর অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য হয়।

সম্প্রসারিত ক্রিয়াকর্ম : বন্দুকের গুলি লক্ষ্যবস্তুকে আঘাত করলে গুলি ও বস্তু উত্তপ্ত হয় কেন ?

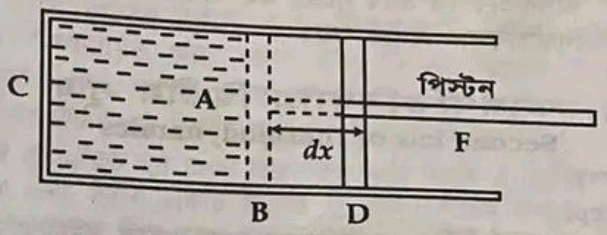
লক্ষ্যবস্তুকে আঘাত করলে গুলির বেগ প্রতিহত হয় এবং এর গতিশক্তির কিছু অংশ তাপশক্তি তাই গুলি ও বস্তুর উষ্ণতা বেড়ে যায়। ফলে এরা উত্তপ্ত হয়।

১·৬ তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি ও কাজ
Heat, internal energy and work

আমরা জানি যখন কোনো গ্যাস প্রসারিত হয়, তখন গ্যাস নিজে কিছু বাহ্যিক কাজ সম্পন্ন করে। গ্যাস যখন সঙ্কুচিত হয়, তখন গ্যাসের ওপর কিছু কাজ সম্পাদিত হয়। এখানে আমরা **গ্যাসের প্রসারণে সম্পাদিত কাজের পরিমাণ** নির্ণয় করব।

মনে করি C কুপরিবাহী পদার্থের তৈরি একটি ধাতব চোঙ [চিত্র ১·১০]। এখন চোঙের মধ্যে কিছু পরিমাণ গ্যাস ভরে এর মুখ হালকা, ঘর্ষণ মুক্ত ও বায়ু নিরুদ্ধ পিস্টন F দ্বারা বন্ধ করি। ফলে পিস্টন বিনা বাধায় চলাচল করতে পারে। উল্লেখ্য, পিস্টনও কুপরিবাহী পদার্থের তৈরি।

যদি আবদ্ধ গ্যাসের চাপ P এবং পিস্টন কিংবা চোঙের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল A হয়, তবে পিস্টনের ওপর গ্যাস কর্তৃক প্রযুক্ত বল F = চাপ × ক্ষেত্রফল বা, $F = P \times A$



চিত্র ১·১০

মনে করি গ্যাস স্থির চাপে প্রসারিত হলো, ফলে পিস্টনটি B স্থান হতে D স্থানে সরে গিয়ে dx দূরত্ব অতিক্রম করল।

অতএব সম্পাদিত কাজ

dW = বল × সরণ

বা, $dW = F \times dx = PA\,dx$

বা, $\boxed{dW = P.dV}$ ... ... (1.20)

[এখানে $A.dx = dV$ = গ্যাসের প্রসারণজনিত আয়তন বৃদ্ধি]

অর্থাৎ কাজ = চাপ × আয়তন পরিবর্তন

এই কাজকে বাহ্যিক কাজ (external work) বলে।

[বি. দ্র. গ্যাসের সম্প্রসারণে কৃত কাজ ধনাত্মক এবং সংকোচনে কৃত কাজ ঋণাত্মক]

যদি গ্যাসের প্রাথমিক আয়তন V_1 এবং প্রসারণের পর শেষ আয়তন V_2 হয়, তবে গ্যাস কর্তৃক সম্পাদিত কাজ

$dW = P(V_2 - V_1)$ ... ... (1.21)

যদি গ্যাসের আয়তন প্রসারণের সময় চাপও পরিবর্তিত হয়, তবে

$dW = dP.dV = (P_1 - P_2)(V_2 - V_1)$ ... ... (1.22)

এখানে, P_1 = গ্যাসের আদি চাপ এবং P_2 = প্রসারণের পর শেষ চাপ। চাপ Nm^{-2} এবং আয়তন m^3 এককে প্রকাশ করা হলে কাজের একক হবে J (জুল)।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র থেকে আমরা জানি কোনো সিস্টেমে dQ পরিমাণ তাপশক্তি সরবরাহ করার ফলে কোনো সিস্টেমের অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন du এবং বাহ্যিক কৃত কাজ dW হলে

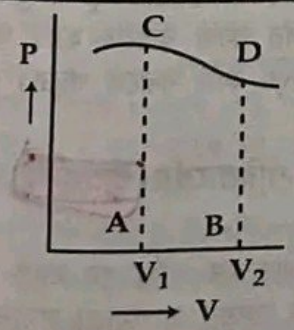
$\boxed{dQ = du + dW}$

বা, $dQ = du + PdV$ ... ... (1.23)

বা, $dQ = du + P(V_2 - V_1)$ ... ... (1.24)

সমীকরণ (1.23) এবং (1.24) হলো সমচাপীয় প্রক্রিয়ায় তাপ, অভ্যন্তরীণ শক্তি এবং কাজের মধ্যে সম্পর্ক।

নিজে কর : যে কোনো তাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজের পরিমাণ PV লেখচিত্রে প্রদর্শন কর।



চিত্র ১·১১

যে কোনো তাপীয় প্রক্রিয়ায় কৃত কাজের পরিমাণ PV লেখচিত্রের সাহায্যে নির্ণয় করা যায়। এই লেখচিত্রকে **নির্দেশক চিত্র** বলে। যেহেতু গ্যাসের চাপ এর আয়তনের সাথে পরিবর্তিত হয়, তাই নির্দেশক চিত্র উল্লিখিত PV লেখচিত্রের ন্যায় হবে। গ্যাসের এই পরিবর্তনের জন্য কৃত কাজের পরিমাণ নির্দেশক চিত্র ১·১১-এর CABD ক্ষেত্রফলের সমান হবে।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের সীমাবদ্ধতা
Limitations of the first law of thermodynamics

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের নিম্নোক্ত সীমাবদ্ধতা রয়েছে :

১। উষ্ণ বস্তু হতে তাপ শীতল বস্তুতে প্রবাহিত হলেও শীতল বস্তু হতে তাপ কখনই উষ্ণ বস্তুতে যেতে পারে না। যদিও শীতল বস্তু হতে উষ্ণ বস্তুতে তাপ যাওয়ার বিষয়টি তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র বা শক্তির সংরক্ষণ সূত্র মেনে চলে। কিন্তু বাস্তবে এই ঘটনা কখনই ঘটে না।

২। কোনো সিস্টেমে প্রযুক্ত তাপের কিছু অংশ কাজে পরিণত হয়; কিন্তু পুরোটাই কাজে পরিণত হবে কিনা বা হতে পারে কিনা তা প্রথম সূত্র থেকে জানা যায় না।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের এই সীমাবদ্ধতার জন্য তাপগতিবিদ্যার আরও একটি সূত্রের প্রয়োজন হয়। সেটিই হলো তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র।

১·৭ তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র
Second law of thermodynamics

ধারণা
Concept

ইতোপূর্বে বিভিন্ন প্রকার শক্তির সঙ্গে আমরা পরিচিত হয়েছি। সকল শক্তিই কাজ করার সামর্থ্য যোগায়। যেমন যান্ত্রিক শক্তি, বিদ্যুৎ শক্তি, রাসায়নিক শক্তি, সৌর শক্তি, তাপশক্তি ইত্যাদি। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র থেকে আমরা জেনেছি যে তাপ কাজে এবং কাজ তাপে রূপান্তরিত হতে পারে। তবে কোন দিকে তাপ প্রবাহিত হবে বা কাজ সম্পাদিত হবে তা প্রথম সূত্র থেকে জানা যায় না। এছাড়া নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপশক্তিকে সম্পূর্ণরূপে কাজে পরিণত করা যায় না। যান্ত্রিক শক্তিসহ বিভিন্ন ধরনের শক্তি থেকে তাপ শক্তি সহজেই পাওয়া যায়; কিন্তু তাপ ইঞ্জিন ছাড়া তাপ থেকে যান্ত্রিক শক্তি তথা কাজ সম্পাদন সম্ভব নয়। যেমন জলপ্রপাতের পানির পতনে সৃষ্ট তাপশক্তিকে অন্য কোনো যন্ত্রের সাহায্য ছাড়া অন্য শক্তিতে রূপান্তর করা যায় না। তাই ইঞ্জিনের উপর বিভিন্ন গবেষণার ফলাফল থেকে বিখ্যাত প্রকৌশলী সাদি কার্নো (Sadi Carnot) এই সিদ্ধান্তে উপনীত হন যে, তাপশক্তিকে কখনই সম্পূর্ণরূপে কাজে পরিণত করা যায় না। **এই বক্তব্যই তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের ভিত্তি।**

বিজ্ঞানী **ক্লসিয়াস** এবং **কেলভিন** পৃথক পৃথকভাবে কার্নোর উপরোক্ত তথ্যের যে সাধারণ রূপ দেন তাই তাপ-গতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র নামে পরিচিত। তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রটি বিভিন্ন রূপে প্রকাশ করা যায়, তবে প্রত্যেকটি প্রস্তাবনার মূলভাব একই এবং তা হচ্ছে তাপ কখনও স্বতঃস্ফূর্তভাবে নিম্ন তাপমাত্রার বস্তু হতে উচ্চ তাপমাত্রার বস্তুতে যেতে পারে না। এই সূত্রের সংক্ষিপ্ত রূপ—**"Efficiency cannot be one"** অর্থাৎ **কোনো কিছুর দক্ষতা এক হতে পারে না।** এসব প্রস্তাবনার মধ্যে **ক্লসিয়াসের** প্রস্তাবনাকে নিখুঁত ও উন্নত বলে গণ্য করা হয়েছে।

নিম্নে সূত্রটির বিশেষ কয়েকটি রূপ বর্ণনা করা হলো।

(ক) ক্লসিয়াসের বিবৃতি (Clausius's statement) : বাইরের কোনো শক্তির সাহায্য ব্যতিরেকে কোনো স্বয়ংক্রিয় যন্ত্রের পক্ষে নিম্ন তাপমাত্রার কোনো বস্তু হতে উচ্চ তাপমাত্রার কোনো বস্তুতে তাপের স্থানান্তর সম্ভব নয়।"

অন্য কথায়, **"বাইরের কোনো শক্তি কর্তৃক সম্পাদিত কাজ ব্যতিরেকে শীতল বস্তু হতে উষ্ণ বস্তুতে তাপ নিজে প্রবাহিত হতে পারে না।"**

উপরের বিবৃতি হতে এটি পরিষ্কার বোঝা যায় যে, তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র পদার্থবিদ্যার অন্যান্য শাখার অন্তর্ভুক্ত বিভিন্ন ঘটনার সাথে সংগতিপূর্ণ। যেমন বাইরে থেকে কোনো বস্তুর ওপর কাজ সম্পন্ন না করলে বস্তু কখনই নিম্ন তল হতে উচ্চ তলে যেতে পারে না। পুনঃ, কাজ না করলে নিম্ন বিভব তল হতে উচ্চ বিভব তলে বিদ্যুৎ প্রবাহিত হতে পারে না, ইত্যাদি। উক্ত সূত্র হতে বোঝা যায় যে, উষ্ণতর বস্তু হতে শীতলতর বস্তুতে তাপ আপনা হতেই প্রবাহিত হতে পারে।

পাহাড়ের ওপর থেকে কোনো বস্তু গড়িয়ে দিলে স্বাভাবিকভাবে বস্তুটি নিচে চলে আসে। কিন্তু বস্তুটিকে নিচে থেকে ওপরে নিতে হলে বাইরের শক্তি ব্যবহার করেই করতে হয়; অর্থাৎ বস্তুর ওপর কাজ করতে হয়। আজ পর্যন্ত এমন কোনো হিমায়ন যন্ত্র (refrigerator) অবিষ্কার করা যায়নি যা শক্তির সরবরাহ ছাড়া কাজ করতে পারে। এই ঘটনা ক্লসিয়াস প্রদত্ত তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের সত্যতা প্রমাণ করে।

(খ) কেলভিনের বিবৃতি (Kelvin's statement) : "কোনো বস্তুকে তার পরিপার্শ্বের শীতলতম অংশ হতে অধিকতর শীতল করে শক্তির অবিরাম সরবরাহ পাওয়া সম্ভব নয়।"

এই সূত্র হতে বুঝা যায় যে, তাপকে কাজে পরিণত করা যায় ততক্ষণ পর্যন্ত যতক্ষণ পর্যন্ত যে বস্তু হতে তাপ গ্রহণ করা হয় তা তার পরিপার্শ্বের শীতলতম অংশ হতে অধিকতর শীতল হবে না। দুটি বস্তুর তাপমাত্রা সমান হলে ওই বস্তুদ্বয়ের মধ্যে তাপের পরিমাণ যত কম বেশিই হোক না কেন এক বস্তু হতে অন্য বস্তুতে তাপ প্রবাহিত হবে না।

(গ) প্ল্যাংক-এর বিবৃতি (Planck's statement) : "কোনো তাপ উৎস হতে অনবরত তাপ শোষণ করবে এবং তা সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হবে এরূপ একটি তাপ ইঞ্জিন তৈরি করা সম্ভব নয়।"

(ঘ) কার্নোর বিবৃতি (Carnot's statement) : "কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপশক্তি সম্পূর্ণ বা পুরোপুরিভাবে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তর করার মতো যন্ত্র তৈরি করা সম্ভব নয়।"

সম্প্রসারিত ক্রিয়াকর্ম : তাপগতিবিদ্যার প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রের তুলনামূলক আলোচনা কর।

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র ও দ্বিতীয় সূত্রের মূল পার্থক্য বোঝা প্রয়োজন। প্রথম সূত্রটি শক্তির সংরক্ষণ সূত্রেরই বিশেষ রূপ। প্রথম সূত্রের প্রস্তাবনা এই যে, তাপ ও যান্ত্রিক শক্তি উভয়ই শক্তির বিভিন্ন রূপ এবং একরূপ হতে অন্যরূপে পরিবর্তন সম্ভব। এছাড়া রূপান্তরের সময় একে অন্যের সমতুল্য, এটিও প্রথম সূত্রের সাহায্যে জানা যায়। বাস্তবক্ষেত্রে যদিও আমরা একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ কার্যকে সম্পূর্ণভাবে তাপে রূপান্তর করতে পারি; কিন্তু একটি নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপকে সম্পূর্ণরূপে কার্যে রূপান্তর করার পরিকল্পনা কখনও বাস্তবায়িত করা সম্ভব নয়। কিংবা, তাপের উৎপত্তি কোথায়— কোনো উত্তপ্ত বস্তুতে, না কোনো শীতল বস্তুতে। এসব প্রশ্নের উত্তর আমরা প্রথম সূত্র হতে পাই না। তাপগতিবিদ্যার সাথে সামঞ্জস্যপূর্ণ এসব প্রশ্নের আলোচনাই তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের প্রতিপাদ্য বিষয়।

তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র অনুসারে তাপ যখন কাজে রূপান্তরিত হয় তখন তার কিছু অংশ কাজে রূপান্তরিত হয়, সম্পূর্ণ তাপ কাজে রূপান্তরিত হয় না। অধিকন্তু ওই রূপান্তরের জন্য সর্বদা একটি উত্তপ্ত ও একটি শীতল বস্তুর যুগপৎ উপস্থিতি প্রয়োজন। উত্তপ্ত বস্তু হতে শীতল বস্তুতে তাপ গমনকালে কিছু কাজ সম্পন্ন হবে।

তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম, প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রের মূল বক্তব্য

(১) তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্রের মূল বক্তব্য হলো—প্রকৃতিতে তাপমাত্রা নামক একটি প্রয়োজনীয় তাপগতীয় চল রাশি রয়েছে।

(২) তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের মূল বক্তব্য হলো—প্রকৃতিতে অভ্যন্তরীণ শক্তি নামক একটি প্রয়োজনীয় তাপগতীয় চল রাশি রয়েছে এবং

(৩) তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের মূল বক্তব্য হলো—প্রকৃতিতে এনট্রপি নামে একটি প্রয়োজনীয় তাপগতীয় চল রাশি রয়েছে।

হিসাব কর : একটি গাড়ির চাকাকে পাম্প করে এর চাপ 1 atm হতে বাড়িয়ে 2 atm করার সাথে সাথে হঠাৎ টায়ারটি ফেটে গেল। ওই দিনের তাপমাত্রা 30°C হলে টায়ার ফাটার অব্যবহিত পরে এর তাপমাত্রা কত ছিল ? এর ফলে টায়ারের ভেতরের বায়ু কর্তৃক কৃত কাজের পরিমাণ বের কর।

সম্প্রসারিত ক্রিয়াকর্ম : মনে কর, গ্রীষ্মকালে সকল নদ-নদীর, সমুদ্রের পানি বাষ্পায়িত হয়ে শুকিয়ে গেল। আবার শীতকালে তা জমে বরফে পরিণত হলো। যদি এ ধরনের ঘটনা ঘটে, তাহলে তাপগতিবিদ্যার কোন সূত্র ব্যর্থ হবে ?

তাপগতিবিদ্যার ২য় সূত্র অনুযায়ী, যেহেতু দক্ষতা কখনই এক বা 100% পাওয়া সম্ভব নয় তাই এ ক্ষেত্রে তাপ-গতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র ব্যর্থ বা অকার্যকর হবে।

১.৮ প্রত্যাবর্তী এবং অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া
Reversible and irreversible processes

কোনো সংস্থা বা সিস্টেম (system) যখন এক অবস্থা হতে অন্য অবস্থায় যায়, তখন অবস্থার এই পরিবর্তন দুই প্রক্রিয়ায় সংঘটিত হয়, যথা—

(১) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া এবং (২) অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া। এখন দুটি প্রক্রিয়া বিশদভাবে আলোচনা করা হলো।

১.৮.১ প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া
Reversible process

মনে কর, তোমার হাতে এক টুকরা বরফ আছে, এই বরফকে পাত্রে রেখে নির্দিষ্ট পরিমাণ তাপ প্রয়োগ কর। দেখা যাবে যে, তা তাপ শোষণ করে 0°C তাপমাত্রায় বরফ টুকরা পানিতে পরিণত হয়েছে। এবার ওই একই পরিমাণ তাপ বের করে নিলে দেখবে ওই পানি পুনরায় বরফে পরিণত হয়েছে। এটি একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া। তবে পরিপূর্ণ প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া পাওয়া যাবে না, কেননা খুব সামান্য হলেও কিছু পরিমাণ তাপ প্রকৃতিতে ক্ষয় হয়। অতএব বলা যায় প্রকৃতিতে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার কোনো অস্তিত্ব নেই।

সংজ্ঞা : যে প্রক্রিয়া বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করে এবং সম্মুখবর্তী ও বিপরীতমুখী প্রক্রিয়ার প্রতি স্তরে তাপ ও কাজের ফলাফল সমান ও বিপরীত হয় সেই প্রক্রিয়াকে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে। একে প্রত্যাগামী প্রক্রিয়াও বলা হয়।

সাধারণ চাপে ও 273K তাপমাত্রায় কিছু পরিমাণ বরফ পানিতে পরিণত হতে যে পরিমাণ তাপ শোষণ করে ওই পরিমাণ পানি বরফে পরিণত হতে একই পরিমাণ তাপ বর্জন করে। কাজেই এটি একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য
Characteristics of reversible process

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সংস্থার পরিবর্তন ঘটে খুবই ধীরে এবং অতি ক্ষুদ্র পরিমাণে যে পর্যন্ত না সমগ্র পরিবর্তন সংঘটিত হয়। এই প্রক্রিয়া এত ধীরে সংঘটিত হয় যে, প্রতিটি ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র ধাপে সংস্থা কার্যত তাপগতীয় সাম্যাবস্থা (Thermodynamical equilibrium) বজায় রাখে। উপরন্তু এই প্রক্রিয়ায় অস্থিতিস্থাপকতা, সান্দ্রতা, ঘর্ষণ, বৈদ্যুতিক রোধ, চুম্বকীয় হিস্‌টেরিসিস প্রভৃতির ন্যায় অবক্ষয়ী ফলাফলগুলি (dissipative effects) থাকবে না। মোট কথা এটি মূলত স্থৈতিক (quasi-static) এবং অনবক্ষয়ী (non-dissipative) হবে। এই প্রক্রিয়া এমনভাবে সংঘটিত করতে হবে যাতে প্রক্রিয়ার শেষে সংস্থা (system) ও পরিপার্শ্বের কোনোরূপ নিট পরিবর্তন ব্যতিরেকে উভয়েই প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে যেতে পারে। এটি একটি ধীর প্রক্রিয়া এবং সংস্থা তাপগতির সাম্যাবস্থা বজায় রাখে।

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার শর্ত : প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার শর্তগুলো হলো—

(ক) প্রক্রিয়াটি অবশ্যই খুব ধীরে সংঘটিত হতে হবে এবং

(খ) কোনো প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী হবে যদি প্রক্রিয়াটি চলাকালীন কোনো অপচয়ী শক্তির সৃষ্টি না হয়।

ঘর্ষণ, সান্দ্রতা, রোধ ইত্যাদি হলো অপচয়ী শক্তির উৎস। সুতরাং ঘর্ষণ, সান্দ্রতা, রোধ ইত্যাদির বিরুদ্ধে ঘটা কোনো প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী হবে না।

উদাহরণ (Examples) : বাস্তব ক্ষেত্রে সম্পূর্ণ প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ার উদাহরণ দেয়া সম্ভবপর নয়। তবে কিছু কিছু প্রক্রিয়া আছে যাদেরকে আপাতভাবে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলা যেতে পারে। এমন কতকগুলো প্রক্রিয়া নিম্নে উল্লেখ করা হলো।

(i) খুব ধীরে সংঘটিত করলে সমোষ্ণ এবং রুদ্ধতাপ পরিবর্তন প্রত্যাবর্তী হবে। কারণ এক্ষেত্রে ঘর্ষণের ন্যায় অবক্ষয়ী বল না থাকায় এবং প্রক্রিয়াটি খুব ধীরে সংঘটিত হওয়ায় পরিবহন, পরিচলন ও বিকিরণের দরুন তাপ বা শক্তি ক্ষয় হয় না।

(ii) প্রতি গ্রামে 80 ক্যালরি (cal) বা 336 J তাপশক্তি শোষণ করে স্বাভাবিক চাপের 0°C তাপমাত্রায় বরফ পানিতে পরিণত হয়। আবার স্বাভাবিক চাপে 0°C তাপমাত্রার পানি হতে প্রতি গ্রামে 80 ক্যালরি তাপ বা 336 J তাপশক্তি অপসারণ করলে পুনরায় বরফ পাওয়া যায়। সুতরাং প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তী।

(iii) কিছুটা ওপর হতে একটি স্থিতিস্থাপক বলকে একটি স্থিতিস্থাপক ইস্পাত পাতের ওপর ফেলা হলে শক্তির কোনো অপচয় না হওয়ায় বলটি আবার তার প্রাথমিক উচ্চতা পর্যন্ত ওপরে উঠবে। সুতরাং প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তী।

(iv) স্থিতিস্থাপক সীমার মধ্যে খুব ধীরে কোনো স্প্রিংকে সম্প্রসারণ করলে প্রতি ধাপে প্রসারণের সময় স্প্রিং-এর ওপর যে পরিমাণ কাজ করা হবে সঙ্কোচনের সময় স্প্রিং সেই পরিমাণ কাজ সম্পন্ন করবে। সুতরাং প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তী।

১.৮.২ অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া
Irreversible process

ধরা যাক, পানি ভর্তি একটি কাচের গ্লাস হাতে নিয়ে একজন দাঁড়িয়ে আছে। হঠাৎ করে মেঝের ওপর গ্লাসটি পড়ে গিয়ে ভেঙ্গে গেল, ফলে পানি মেঝের ওপর ছড়িয়ে পড়ল। এখন এই পানি এবং ভাঙ্গা গ্লাসকে একত্রিত করা কখনই সম্ভব নয়। এক্ষেত্রে কার্যনির্বাহক বস্তুকে অর্থাৎ পানিকে পুনরুদ্ধার করা সম্ভব নয়। আবার ঘটনাটি খুব দ্রুত সংঘটিত হয়েছে। এটি একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

আবার, ধরা যাক দুটি আবদ্ধ পাত্র রয়েছে যার মধ্যে একটি পাত্র গ্যাসপূর্ণ এবং অন্যটি খালি। এখন একটি নল দ্বারা পাত্র দুটি যুক্ত করে দিলে দেখা যাবে যে গ্যাসপূর্ণ পাত্রটি হতে গ্যাস শূন্য পাত্রে গমন করছে। এক সময় দেখা যাবে উভয় পাত্রের গ্যাসের চাপ সমান হয়েছে। এই প্রক্রিয়াটিতে গ্যাস কোনো বাহ্যিক কাজ করে না। এখন বহু চেষ্টা করলেও গ্যাসটি নিজে থেকে আর আগের অবস্থায় ফিরে যেতে পারে না। শুধুমাত্র বাহ্যিক কাজ করলেই তা সম্ভব। সুতরাং এই প্রক্রিয়াটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

সংজ্ঞা : যে প্রক্রিয়া সম্মুখগামী হওয়ার পর বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করতে পারে না, তাকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে। একে অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া বা অনপনেয় প্রক্রিয়াও বলা হয়।

অথবা, যে প্রক্রিয়ায় সম্ভাব্য সব প্রাকৃতিক উপায় সত্ত্বেও সমগ্র সংস্থাকে পুরোপুরি প্রাথমিক অবস্থায় ফিরিয়ে আনা যায় না বা যে প্রক্রিয়া বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করতে পারে না তাকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে।

অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার বৈশিষ্ট্য
Characteristics of irreversible process

(১) অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া হঠাৎ এবং স্বতঃস্ফূর্তভাবে (spontaneously) সংঘটিত হয়।

(২) প্রকৃতিতে সব প্রক্রিয়া স্বতঃস্ফূর্তভাবে ঘটে থাকে। সুতরাং প্রাকৃতিক প্রক্রিয়া মাত্রই অপ্রত্যাবর্তী।

(৩) এই প্রক্রিয়ায় সংস্থা কখনই তার প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে যাবার প্রবণতা দেখায় না।

(৪) এটি একটি দ্রুত প্রক্রিয়া এবং এটি তাপগতীয় সাম্যাবস্থা বজায় রাখে না।

উদাহরণ (Examples) : নিম্নে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার কয়েকটি উদাহরণ দেওয়া হলো।

(i) বৈদ্যুতিক রোধের মধ্য দিয়ে বিদ্যুৎ প্রবাহিত হলে তাপ সৃষ্টি হয়। এটি একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

(ii) দুটি বস্তুর ঘর্ষণের দরুন যে তাপ সৃষ্টি হয় তা একটি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া। কারণ ঘর্ষণের বিরুদ্ধে যে কাজ করা হয় তাই তাপে রূপান্তরিত হয় এবং ওই তাপ কোনো প্রকারেই কাজে পরিণত করা যায় না।

(iii) ভিন্ন তাপমাত্রার দুটি বস্তুকে পরস্পরের সংস্পর্শে স্থাপন করলে তাপ অধিক তাপমাত্রার বস্তু হতে কম তাপমাত্রার বস্তুতে প্রবাহিত হবে। কিন্তু কম তাপমাত্রার বস্তু হতে অধিক তাপমাত্রার বস্তুতে তাপ প্রবাহের কোনো প্রবণতা নেই। সুতরাং এটি একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

(iv) বন্দুক হতে গুলি ছুড়লে বারুদের বিস্ফোরণ ঘটে। এই বিস্ফোরণ অতি দ্রুত সংঘটিত হয়। এই প্রক্রিয়া অপ্রত্যাবর্তী।

প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার মধ্যে তুলনা ***

(১) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া একটি অতি ধীর প্রক্রিয়া। অপরদিকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া একটি দ্রুত প্রক্রিয়া।

(২) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া স্বতঃস্ফূর্ত প্রক্রিয়া নয়। পক্ষান্তরে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া একটি স্বতঃস্ফূর্ত ও একমুখী প্রক্রিয়া।

(৩) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় কার্যনির্বাহক বস্তু প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে। পক্ষান্তরে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় কার্য-নির্বাহক বস্তু প্রাথমিক অবস্থায় ফিরে আসে না।

(৪) প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের তাপগতীয় সাম্যাবস্থা বজায় থাকে। পক্ষান্তরে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের তাপগতীয় অবস্থা বজায় থাকে না।

১·৯ কার্নোর চক্র
Carnot's cycle → 1824

কার্নো চক্র আলোচনা করার পূর্বে কার্নো ইঞ্জিন সম্বন্ধে কিছুটা ধারণা থাকা দরকার। ফরাসি বিজ্ঞানী সাদি কার্নো (1832) সকল দোষ-ত্রুটি মুক্ত একটি ইঞ্জিনের পরিকল্পনা করেন। এটি একটি আদর্শ ইঞ্জিন যার কর্মদক্ষতা 100% এমন একটি ইঞ্জিনের বাস্তব রূপ দেওয়া কখনই সম্ভব নয়। এটি একটি কাল্পনিক ইঞ্জিন মাত্র। কার্নো ইঞ্জিন চারটি স্তরে কাজ সম্পন্ন করে।

কার্নো চক্রের মূলনীতি

কার্নো চক্রে প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ার মাধ্যমে কার্যনির্বাহক বস্তু উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে একটি নির্দিষ্ট চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রা হতে আরম্ভ করে একটি সমোষ্ণ প্রসারণ ও একটি রুদ্ধতাপীয় প্রসারণ এবং একটি সমোষ্ণ সংকোচন ও একটি রুদ্ধতাপীয় সংকোচনের মাধ্যমে তাপের কিছু অংশ কাজে রূপান্তরিত করে এবং বাকি অংশ তাপ গ্রাহকে বর্জন করে আদি অবস্থায় ফিরে আসে।

ইঞ্জিনের বর্ণনা (Description of the engine)

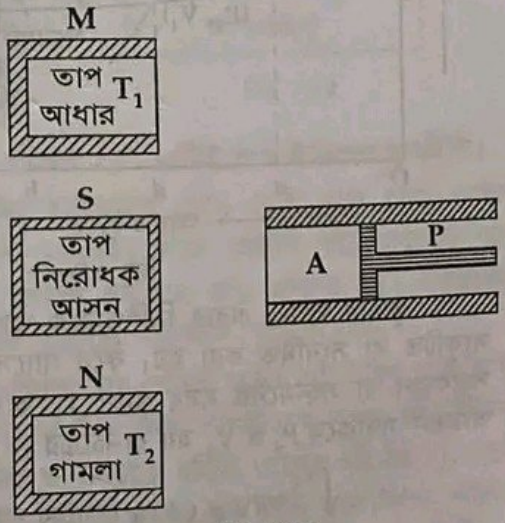
এই ইঞ্জিনে নিম্নলিখিত অংশগুলো আছে :

(i) **চোঙ বা সিলিন্ডার (Cylinder), A** [চিত্র ১·১২] : এর তিনদিকের দেয়াল সম্পূর্ণ তাপ অন্তরক পদার্থের তৈরি; কিন্তু তলদেশ সম্পূর্ণ তাপ পরিবাহী পদার্থ দ্বারা তৈরি। চোঙের অভ্যন্তরে কার্যকরী পদার্থ (working substance) আবদ্ধ থাকে। চোঙটির অভ্যন্তরে তাপ অন্তরক পদার্থের তৈরি একটি পিস্টন P ঘর্ষণহীনভাবে চলাচল করতে পারে। ইঞ্জিনে কার্যকরী পদার্থ হিসেবে কোনো আদর্শ গ্যাস ব্যবহার করা হয়।

(ii) **তাপ আধার বা তাপ উৎস (Heat source), M** : T_1 পরম তাপমাত্রায় রাখা অতি উচ্চ তাপগ্রাহিতাযুক্ত একটি উত্তপ্ত বস্তু। এটি তাপ আধার বা উৎস হিসেবে কাজ করে। এর তাপমাত্রা সর্বদা স্থির থাকে।

(iii) **তাপ গামলা বা তাপ গ্রাহক (Heat sink), N** : T_2 পরম তাপমাত্রায় রাখা অনুরূপ একটি শীতল বস্তু বা সিংক যা তাপ গ্রাহক হিসেবে কাজ করে। এর তাপগ্রাহিতা অতি উচ্চ। এর তাপমাত্রাও সর্বদা স্থির থাকে। $T_2 << T_1$

(iv) **আসন, S** : S সম্পূর্ণ তাপ নিরোধক বা অন্তরক একটি পাটাতন বা আসন। এর ওপর চোঙকে বসানো যায়। তাপ আধার এবং তাপ গ্রাহক উভয়ই উচ্চ তাপগ্রাহিতাযুক্ত হওয়ায় তাদের সাথে চোঙে তাপ আদান-প্রদান হলে তাদের তাপমাত্রা অপরিবর্তিত থাকে। চোঙ, তাপ আধার, তাপ গামলা তাপ অন্তরক আসনের ওপর বসানো যেতে পারে এবং ঘর্ষণবিহীনভাবে সরানো যেতে পারে।



চিত্র ১·১২

কার্নো চক্র একটি প্রত্যাগামী চক্র

Carnot cycle is a reversible cycle

কোনো চক্র প্রত্যাগামী হতে হলে যে সমস্ত বৈশিষ্ট্য থাকা প্রয়োজন কার্নোর আদর্শ ইঞ্জিনে সেগুলো রয়েছে। যেমন—

(১) পিস্টন ও চোঙ বা সিলিন্ডারের মধ্যে কোনো ঘর্ষণ নেই।

(২) কার্যকরী পদার্থ (গ্যাস)-এর ওপর প্রযুক্ত প্রক্রিয়াগুলো খুব ধীরে সংঘটিত হয়।

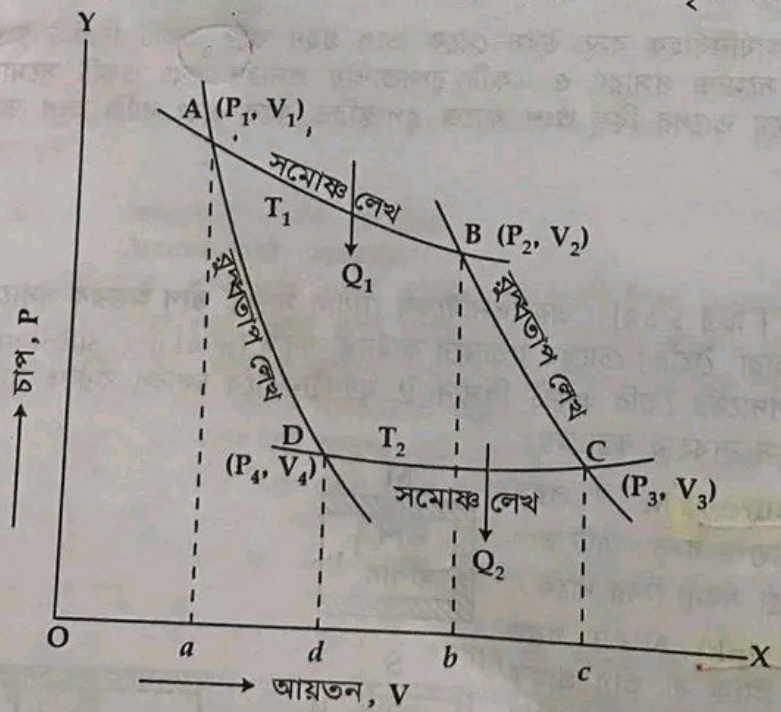
(৩) পিস্টন ও সিলিন্ডার নির্মাণে আদর্শ তাপ নিরোধক বা অন্তরক ও আদর্শ তাপ পরিবাহী ব্যবহার করা হয় এবং তাপ উৎস ও তাপ গ্রাহকের উপাদান এমন অতি উচ্চ তাপগ্রাহিতাযুক্ত করা হয় যে সমোষ্ণ প্রক্রিয়াগুলি স্থির তাপমাত্রায় সংঘটিত হয়।

যে চক্রে কোনো একটি আদর্শ গ্যাস কার্যকরী পদার্থ হিসেবে একটি নির্দিষ্ট আয়তন, চাপ ও তাপমাত্রা হতে আরম্ভ করে একটি সমোষ্ণ প্রসারণ ও একটি রুদ্ধতাপ প্রসারণ এবং একটি সমোষ্ণ সংকোচন ও একটি রুদ্ধতাপ সংকোচনের পর পূর্বাবস্থায় ফিরে আসে, তাকে কার্নো চক্র বলে। কার্নো চক্রের ক্রিয়া ও সম্পাদিত কাজকে চিত্রের সাহায্যে প্রকাশ করা হয়। একে সূচক বা নির্দেশক চিত্র বলে। নিম্নে সূচক বা নির্দেশক চিত্রে কার্নো চক্রের মূলনীতি ব্যবহার করে বিভিন্ন ক্রিয়ার ব্যাখ্যা ও সম্পাদিত কাজের হিসাব করা হলো।

প্রথম ধাপ : এই ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ উৎসের ওপর বসানো হয়। খুবই অল্প সময়ের মধ্যে সিলিন্ডারের কার্যকরী পদার্থের (গ্যাস) তাপমাত্রা উৎসের তাপমাত্রা T_1-এর সমান হয়। নির্দেশক চিত্রে A বিন্দু এই অবস্থা নির্দেশ করে [চিত্র ১·১৩]। ধরা যাক, এই অবস্থায় গ্যাসের চাপ P_1 এবং আয়তন V_1। এরপর গ্যাসকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হতে দেয়া হয়। প্রসারণের সময় ইহা উৎস হতে Q_1 পরিমাণ তাপ গ্রহণ করে। সমোষ্ণ প্রসারণ শেষে গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_2 ও V_2। চিত্রে B বিন্দু দ্বারা এ অবস্থা নির্দেশ করা হয়েছে। এক্ষেত্রে সম্পন্ন বা কৃত কাজ,

$$W_1 = \int_{V_1}^{V_2} P dV = ABba \text{ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।}$$

সুতরাং নির্দেশক চিত্রে AB সমোষ্ণ প্রসারণের জন্য কৃত কাজ, $W_1 = ABba$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।



চিত্র ১·১৩

দ্বিতীয় ধাপ : এই ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ নিরোধক বা অন্তরক আসনের ওপরে বসানো হয় এবং আবদ্ধ গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হতে দেয়া হয়। রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের তাপমাত্রা কমে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা T_2-এর সমান হয়। প্রক্রিয়া শেষে গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_3 ও V_3 হয় যা চিত্রে C বিন্দু দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে। এই প্রসারণের জন্য কৃত কাজ,

$$W_2 = \int_{V_2}^{V_3} P dV$$

$= BCcb$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

সুতরাং নির্দেশক চিত্রে BC রুদ্ধতাপ প্রসারণ বুঝায় এবং এই প্রসারণে কৃত কাজ, $W_2 = BCcb$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

তৃতীয় ধাপ : এবার সিলিন্ডারকে তাপগ্রাহকের ওপর বসানো হয় এবং গ্যাসকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় পিস্টন দ্বারা সংকুচিত বা সংনমিত করা হয়; ফলে গ্যাসের চাপ বৃদ্ধি পায়। এই ধাপে পিস্টন দ্বারা গ্যাসে কাজ সম্পাদিত হয়। সংকোচন বা সংনমনের সময় গ্যাস T_2 তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে Q_2 তাপ বর্জন করে। এই অবস্থায় গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_4 ও V_4 হয় যা চিত্রের D বিন্দু নির্দেশ করে। এক্ষেত্রে সমোষ্ণ সংকোচনে কৃত কাজ,

$$W_3 = \int_{V}^{V_4} P dV = CDdc \text{ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।}$$

সুতরাং নির্দেশক চিত্রের CD সমোষ্ণ লেখ T_2 তাপমাত্রায় গ্যাসের সংকোচন বুঝায় এবং এই প্রক্রিয়ায় কৃত কাজ, $W_3 = CDdc$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

চতুর্থ ধাপ : এই ধাপে সিলিন্ডারকে তাপ নিরোধক বা অন্তরক আসনের ওপর বসানো হয় এবং আবদ্ধ গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় সংকুচিত বা সংনমিত করা হয়। এই আবদ্ধ গ্যাসের ওপর কাজ সম্পাদিত হওয়ায় এর তাপমাত্রা বেড়ে উৎসের তাপমাত্রার সমান হয়। এই প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তন যথাক্রমে P_1 ও V_1 হয়। অর্থাৎ চক্র আদি অবস্থায় ফিরে যায়। চিত্রে A বিন্দু এই অবস্থা নির্দেশ করে। এক্ষেত্রে রুদ্ধতাপীয় সংকোচনে কৃত কাজ,

$W_4 = \int_{V_4}^{V_1} PdV = DAad$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

সুতরাং নির্দেশক চিত্রের DA লেখ রুদ্ধতাপীয় সংকোচন বুঝায় এবং এই পর্যায়ে কৃত কাজ,

$W_4 = DAad$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

প্রচলিত প্রথা অনুসারে আবদ্ধ গ্যাস দ্বারা কৃত কাজ ধনাত্মক এবং গ্যাসের ওপর কৃত কাজ ঋণাত্মক হয়। সুতরাং, W_1 ও W_2 ধনাত্মক এবং W_3 ও W_4 ঋণাত্মক হয়।

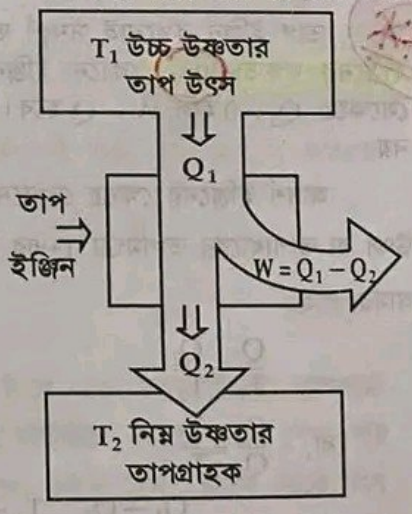
অতএব, আবদ্ধ গ্যাস দ্বারা মোট কৃত কাজ,

$W = W_1 + W_2 - W_3 - W_4 = ABCD$ ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল।

ওপরের বর্ণনা থেকে দেখা যাচ্ছে যে কার্নো চক্রে কার্যকরী পদার্থ (গ্যাস) কর্তৃক কৃত কাজ নির্দেশক চিত্রে দুটি সমোষ্ণ ও দুটি রুদ্ধতাপীয় রেখা দ্বারা আবদ্ধ ক্ষেত্রফলের সমান। এভাবে চারটি ধাপে কার্নো চক্রের মূলনীতি ব্যাখ্যা করা যায়।

১·১০ তাপ ইঞ্জিন
Heat Engine

তাপশক্তিকে কাজে লাগানোর জন্য একটি যান্ত্রিক ব্যবস্থার প্রয়োজন হয়। এই যান্ত্রিক ব্যবস্থাকে তাপ ইঞ্জিন বলে। তাপ ইঞ্জিনে তাপ উৎস এবং তাপগ্রাহক থাকে। ইঞ্জিন কোনো উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে তার খানিকটা কাজে রূপান্তরিত করে। তাপের যেটুকু কাজে রূপান্তরিত হয় না তা পরিবেশে মিশে যায় এবং উৎসের তাপমাত্রা যে পরিবেশে তাপ গ্রহণ করে তা ইঞ্জিনের তাপমাত্রার চেয়ে বেশি হতে হবে। অর্থাৎ ইঞ্জিন উচ্চতর তাপমাত্রার তাপ উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে তার খানিকটা কাজে রূপান্তরিত করে এবং বাকি অংশ তাপগ্রাহকে ছেড়ে দিয়ে আদি অবস্থায় ফিরে আসে। এভাবে ইঞ্জিন চক্র সম্পন্ন করে। একটি তাপ ইঞ্জিনের ব্লক চিত্র দেখান হলো [চিত্র ১·১৪]।



চিত্র ১·১৪

সংজ্ঞা : যে ইঞ্জিন দ্বারা তাপশক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তর করা যায় তাকে তাপ ইঞ্জিন বলে। যেমন বাষ্পীয় ইঞ্জিন, পেট্রোল ইঞ্জিন, ডিজেল ইঞ্জিন ইত্যাদি।

তাপ ইঞ্জিনের মূলনীতি : প্রত্যেক ইঞ্জিনেই একটি কার্যরত পদার্থ (working substance) থাকে। যেমন বাষ্পীয় ইঞ্জিনে বাষ্প কার্যরত বস্তু আবার পেট্রোল ইঞ্জিনে পেট্রোল কার্যরত বস্তু। কার্যরত পদার্থ উচ্চ তাপ-মাত্রার কোনো উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে ওই তাপের কিছু অংশ কার্যে পরিণত করে এবং বাকি অংশ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে। এভাবে কার্যরত বস্তুর ক্রমাগত তাপ গ্রহণ ও বর্জনে প্রত্যেকবার কিছু তাপ কাজে পরিণত হয়। **এটিই তাপ ইঞ্জিনের মূলনীতি।**

যে উৎস থেকে ইঞ্জিন তাপ গ্রহণ করে তার তাপমাত্রা তাপগ্রাহকের তাপমাত্রার চেয়ে বেশি হতে হবে। অর্থাৎ ইঞ্জিনটি উচ্চ তাপমাত্রার কোনো উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে ওই তাপের খানিকটা কাজে পরিণত করে অবশিষ্ট তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে আদি অবস্থায় ফিরে আসে এবং পরবর্তী পর্যায়ের জন্য প্রস্তুত হয়। এগুলোকে এক একটি চক্র বলে। ইঞ্জিন থেকে অবিরাম কাজ পাওয়ার জন্য এভাবে চক্র (cycle) পরিবর্তন করা প্রয়োজন।

চিত্র ১·১৪ অনুযায়ী কার্যরত পদার্থ T_1 তাপমাত্রার উৎস হতে Q_1 পরিমাণ তাপ শোষণ করে। এই ইঞ্জিন দ্বারা কাজ তাপশক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তরিত করার জন্য উৎস হতে শোষিত তাপের কিছু অংশ তাপগ্রাহকে বর্জন করে শীতল হতে হবে যাতে পুনরায় উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করতে পারে। T_2 তাপমাত্রায় তাপগ্রাহকে বর্জিত তাপের পরিমাণ Q_2 হলে ইঞ্জিন দ্বারা কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তির পরিমাণ, $W = Q_1 - Q_2$। যে ইঞ্জিন গৃহীত তাপের যত বেশি অংশ কাজে পরিণত করতে পারে সে ইঞ্জিনের দক্ষতা তত বেশি হয়। বাষ্পীয় ইঞ্জিনের তুলনায় পেট্রোল ইঞ্জিনের দক্ষতা বেশি।

১·১০·১ তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা
Efficiency of heat engine

তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা আলোচনার আগে তাপ ইঞ্জিন কী এবং এর মূলনীতি জানা দরকার। **যে ইঞ্জিন দ্বারা তাপ শক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তর করা যায় তাকে তাপ ইঞ্জিন বলে।** যেমন বাষ্পীয় ইঞ্জিন, পেট্রোল ইঞ্জিন, ডিজেল ইঞ্জিন ইত্যাদি। কোনো ইঞ্জিন কত বেশি কর্মক্ষম তা ওই ইঞ্জিনের দক্ষতা থেকে জানা যায়। শোষিত তাপ ও কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তি দ্বারা ইঞ্জিনের দক্ষতা পরিমাপ করা হয়।

অর্থাৎ কোনো তাপ ইঞ্জিন দ্বারা কাজের রূপান্তরিত তাপশক্তির পরিমাণ ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত তাপশক্তির পরিমাণের অনুপাতকে ইঞ্জিনের দক্ষতা বা কর্মদক্ষতা বলে।

অর্থাৎ ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = \frac{\text{ইঞ্জিন দ্বারা কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তি}}{\text{ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত তাপশক্তি}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$

দক্ষতার হিসাব : ধরা যাক তাপ ইঞ্জিনে কার্যরত পদার্থ T_1 তাপমাত্রার উৎস হতে Q_1 পরিমাণ তাপ গ্রহণ করে W পরিমাণ কাজ সম্পাদন করে এবং অবশিষ্ট তাপ Q_2, T_2 তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে। তাহলে কার্যে পরিণত তাপের পরিমাণ, $W = Q_1 - Q_2$

$$\therefore \text{ইঞ্জিনের তাপীয় দক্ষতা, } \eta = \frac{\text{কার্যে পরিণত তাপ}}{\text{উৎস হতে গৃহীত তাপ}} = \frac{W}{Q_1}$$

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.25)$$

সমীকরণ (1.25) হতে দেখা যায় যে, Q_2-এর মান যত কম হবে দক্ষতা η তত বেশি হবে।

ইঞ্জিনের দক্ষতা সাধারণত শতকরা হিসাবে প্রকাশ করা হয়।

$$\therefore \text{ইঞ্জিনের তাপীয় দক্ষতা, } \eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\%$$

তাপ ইঞ্জিন কখনোই সম্পূর্ণ তাপকে কাজে বা যান্ত্রিক শক্তিতে পরিণত করতে পারে না। সাধারণত একটি তাপ ইঞ্জিনের দক্ষতা 30% কোনো ইঞ্জিন যদি তাপ বর্জন না করে তাহলে গৃহীত তাপ সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হয়। সেক্ষেত্রে $Q_2 = 0$ হলে $W = Q$ হবে। তখন (1.25) সমীকরণ অনুযায়ী দক্ষতা $\eta = 1$ বা 100% হবে যা বাস্তবে সম্ভব নয়।

আদর্শ ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে দেখানো যায় যে, ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত বা বর্জিত তাপ Q ইঞ্জিনের সংস্পর্শে থাকা তাপ উৎস বা তাপাধারের তাপমাত্রা T-এর সমানুপাতিক অর্থাৎ $\frac{Q}{T}$ = ধ্রুব সংখ্যা। সেক্ষেত্রে তাপীয় ইঞ্জিনের প্রতি চক্রের জন্য আমরা পাই,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

বা, $$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\therefore \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

শতকরা হিসেবে, $$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\% \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.26)$$

এক্ষেত্রে কার্যরত বস্তু T_1K তাপমাত্রায় তাপ গ্রহণ করে এবং T_2K তাপমাত্রায় তাপ বর্জন করে। সমীকরণ (1.26) অনুযায়ী $T_1 > (T_1 - T_2)$; কাজেই দক্ষতা 100% হতে পারে না। তাপ উৎস এবং তাপগ্রাহকের মধ্যবর্তী তাপমাত্রার পার্থক্য যত বেশি হবে দক্ষতা তত বৃদ্ধি পাবে। বাস্তবে দক্ষতা 20%—50% হয়।

সম্প্রসারিত কর্মকাণ্ড : কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা কখনোই 100% হতে পারে না—ব্যাখ্যা কর।

কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$। এই সমীকরণে $T_1 > (T_1 - T_2)$ থেকে দেখা যায় কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা শুধুমাত্র উৎস ও তাপগ্রাহকের তাপমাত্রার ওপর নির্ভর করে। উৎস ও তাপগ্রাহকের মধ্যে তাপমাত্রার পার্থক্য

যত বেশি হবে দক্ষতাও তত বৃদ্ধি পাবে। এখন $\eta = 100\%$ হতে পারে যদি $T_2 = 0$ হয়। অর্থাৎ পরম শূন্য তাপমাত্রায় এটি সম্ভব। কিন্তু কোনো বস্তুর তাপমাত্রাকে কখনই 0 K-এ নামানো যায় না। ফলে কার্নো ইঞ্জিনও 100% দক্ষ হতে পারে না।

কাজ : তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা হ্রাস পেলে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা বৃদ্ধি পায়—ব্যাখ্যা কর।

কার্নো ইঞ্জিন দ্বারা কাজে রূপান্তরিত তাপশক্তি ও ইঞ্জিন দ্বারা শোষিত তাপশক্তির অনুপাতকে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা বলে। কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$ সমীকরণে, T_1 হলো উৎসের তাপমাত্রা এবং T_2 তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা। উক্ত সমীকরণ অনুসারে T_2 এর মান যত হ্রাস পাবে $(T_1 - T_2)$ এর মান তত বৃদ্ধি পাবে। $(T_1 - T_2)$ এর মান যত বাড়বে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা তত বাড়বে। এ কারণে তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা হ্রাস পেলে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা বৃদ্ধি পায়।

১.১০.২ কার্নোর ইঞ্জিনের দক্ষতা
Efficiency of Carnot's engine

কার্নোর ইঞ্জিনকে আদর্শ ইঞ্জিন বলা হয়। এই ইঞ্জিন একটি চক্রে যে পরিমাণ তাপকে কাজে পরিণত করে এবং তাপ উৎস হতে যে পরিমাণ তাপ শোষণ করে, এদের অনুপাতকে ইঞ্জিনের দক্ষতা বলে। ব্যবহারিক যে কোনো ইঞ্জিনের চেয়ে এর দক্ষতা বেশি।

মনে করি কার্নো ইঞ্জিনের কার্যকরী পদার্থ (গ্যাস) কর্তৃক গৃহীত তাপ Q_1 এবং বর্জিত তাপ Q_2। তাহলে কার্যে পরিণত তাপের পরিমাণ $= Q_1 - Q_2$

$$\therefore \text{ইঞ্জিনের দক্ষতা, } \eta = \frac{\text{কার্যে পরিণত তাপ}}{\text{উৎস হতে গৃহীত তাপ}}$$

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.27)$$

কার্নোর চক্রের দক্ষতাকে তাপমাত্রার সাপেক্ষে প্রকাশ করা যায়। সেক্ষেত্রে দেখানো যায়, $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$। অতএব ইঞ্জিনের দক্ষতা, $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

শতকরা হিসাবে প্রকাশ করলে, $\eta = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right) \times 100\%$ ... ... (1.28)

সমীকরণ (1.28) হতে দেখা যায় যে, ইঞ্জিনের কর্ম দক্ষতা কেবল তাপ উৎস এবং তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা T_1 ও T_2 এর ওপর নির্ভর করে। কার্যনির্বাহী বস্তুর প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে না। এই সমীকরণ থেকে আরো দেখা যায় যে, যে কোনো দুটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রার মধ্যে কার্যরত সকল প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনের দক্ষতা সমান হবে। ইঞ্জিন থেকে তাপ বর্জন শূন্য হলে অর্থাৎ গৃহীত তাপ সম্পূর্ণরূপে কাজে রূপান্তরিত হলে $Q_2 = 0$ হবে এবং কাজ $W = Q$ হবে। সেক্ষেত্রে সমীকরণ (1.26) অনুযায়ী $\eta = \frac{Q_1 - 0}{Q_1} = 1$ বা 100% হবে।

অনুধাবনমূলক কাজ : ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা হতে ইঞ্জিন সম্পর্কে কী কী ধারণা করতে পার ?

- ইঞ্জিনের দক্ষতার হিসাব থেকে লক্ষ করা যায় যে, ইহা কেবল তাপ উৎস ও তাপগ্রাহকের তাপমাত্রা T_1, T_2 এর ওপর নির্ভর করে—কার্যনির্বাহক বস্তুর প্রকৃতির ওপর নির্ভর করে না।
- যে কোনো দুটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রার মধ্যে কার্যরত সকল প্রত্যাগামী ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা সমান হয়।
- যেহেতু $T_1 > (T_1 - T_2)$, কাজেই ইঞ্জিনের দক্ষতা কখনই 100% হতে পারে না।
- তাপ উৎস ও তাপগ্রাহকের মধ্যবর্তী তাপমাত্রার মধ্যে পার্থক্য যত বেশি হবে ইঞ্জিনের দক্ষতাও তত বেশি হবে।

৪। 27°C এবং 160°C তাপমাত্রাদ্বয়ের মধ্যে কার্যরত একটি কার্নো ইঞ্জিনে $8{\cdot}4 \times 10^4$ J তাপশক্তি সরবরাহ করা হলো। ইঞ্জিনটির দক্ষতা নির্ণয় কর। ইঞ্জিনটি কতটুকু তাপশক্তিকে কাজে রূপান্তরিত করতে পারবে ?

আমরা জানি,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \times 100\%$$

$$= \frac{433 - 300}{433} \times 100\%$$

$$= \frac{133}{433} \times 100\%$$

$$= 0{\cdot}307 \times 100\% = 30{\cdot}7\%$$

আবার, $\eta = \frac{W}{Q}$

বা, $W = \eta Q = 0{\cdot}307 \times 8{\cdot}4 \times 10^4$ J $= 25788$ J

এখানে,

$T_1 = 160°C = (160 + 273)$ K $= 433$ K

$T_2 = 27°C = (27 + 273)$ K $= 300$ K

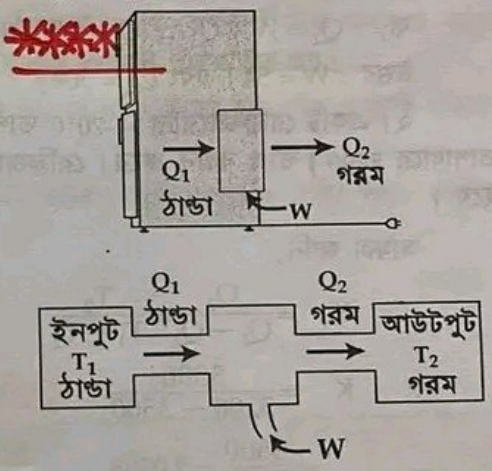
$Q_1 = 8{\cdot}4 \times 10^4$ J

$\eta = ?$

১.১৯ রেফ্রিজারেটর বা হিমায়ক
Refrigerator

হিমায়ন হচ্ছে এমন একটি প্রক্রিয়া যা কোনো আবদ্ধ স্থান বা বস্তু বা সিস্টেমের তাপ অপসারণ করে তার তাপমাত্রা পরিপার্শ্বের তাপমাত্রা অপেক্ষা কম রাখে। আমরা প্রতিদিন মাছ, মাংস, খাবার পানি, আইসক্রিম ইত্যাদি সংরক্ষণ করা এবং ঠান্ডা রাখার জন্য প্রায় সব বাড়িতেই রেফ্রিজারেটর ব্যবহার করি। অর্থাৎ **যে যন্ত্রের সাহায্যে পরিবেশ অপেক্ষা কম তাপমাত্রা সৃষ্টি করা যায় এবং এই তাপমাত্রা সর্বদা স্থির অবস্থায় রাখা যায় তাকে রেফ্রিজারেটর বা হিমায়ক বলা হয়।** কীভাবে খাদ্যদ্রব্য সংরক্ষণ করা এবং ঠান্ডা রাখা হয় তা মূলনীতি থেকে ব্যাখ্যা করা যায়।

মূলনীতি : রেফ্রিজারেটরকে একটি তাপ ইঞ্জিনের বিপরীত যন্ত্র হিসেবে বিবেচনা করা যায়। তাপ ইঞ্জিন উচ্চ তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে কার্য সম্পাদন করে এবং অব্যবহৃত তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে। পক্ষান্তরে রেফ্রিজারেটর নিম্ন তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ বা অপসারণ করে ও উচ্চ তাপমাত্রার আধারে বর্জন করে। নিম্ন তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ অপসারণের জন্য যান্ত্রিক কাজ করতে হয়। রেফ্রিজারেটরে একটি কম্প্রেসর (compressor) যান্ত্রিক কাজ করে। এক্ষেত্রে অপসারিত তাপ Q_1 ও কাজ W এর যোগফল বর্জিত তাপ Q_2 এর সমান। চিত্র ১·১৫ এ একটি রেফ্রিজারেটরের প্রবাহ চিত্র (Flow Diagram) দেখানো হলো। বাড়িতে ব্যবহৃত রেফ্রিজারেটরে Q_1 রেফ্রিজারেটর হতে বাষ্পীভবন কুণ্ডলী দ্বারা অপসারিত তাপ, W কম্প্রেসরের মোটর কর্তৃক সম্পাদিত কাজ এবং Q_2 রেফ্রিজারেটরের বায়ুতে বর্জিত তাপ বুঝায়। **তাপ ইঞ্জিন ও রেফ্রিজারেটরের প্রধান পার্থক্য হলো তাপ ইঞ্জিনে সিস্টেম দ্বারা কাজ সম্পাদিত হয়। অন্যদিকে রেফ্রিজারেটরে সিস্টেমের ওপর কাজ সম্পাদিত হয়।**



চিত্র ১·১৫

কার্যকৃত সহগ (Co-efficient of Performance) : রেফ্রিজারেটর হতে অপসারিত তাপ ও কম্প্রেসর কর্তৃক সরবরাহকৃত যান্ত্রিক কাজের অনুপাতকে কার্যকৃত সহগ বলে। একে K দ্বারা প্রকাশ করা হয়।

এখন, রেফ্রিজারেটরের বাষ্পীভবন কুণ্ডলী হতে অপসারিত তাপ Q_1, কম্প্রেসর কর্তৃক সরবরাহকৃত কাজ W এবং ঘনীভবন কুণ্ডলীতে বর্জিত তাপ Q_2 হলে, শক্তির নিত্যতা সূত্র অনুসারে পাওয়া যায় [চিত্র ১·১৫],

$$Q_2 = Q_1 + W$$

$$\therefore \quad W = Q_2 - Q_1$$

সুতরাং সূত্রানুসারে কার্যকৃত সহগ, $K = \frac{\text{অপসারিত তাপ}}{\text{সরবরাহকৃত কাজ}} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$

অর্থাৎ **রেফ্রিজারেটরের দক্ষতা বা কর্মসম্পাদন সহগ বা কার্যকৃত সহগ হচ্ছে নিম্ন তাপমাত্রার তাপাধার হতে অপসারিত তাপ ও বহিস্থ সংস্থা বা কম্প্রেসর কর্তৃক সম্পাদিত কাজের অনুপাত।**

কার্যকৃত সহগ যত বেশি হবে, তত কম যান্ত্রিক কাজ ব্যয় করে রেফ্রিজারেটর হতে বেশি তাপ গ্রহণ বা অপসারণ করা যাবে। রেফ্রিজারেটরে সাধারণত কার্যকৃত সহগ K-এর মান 2 থেকে 6 এর মধ্যে হয়।

রেফ্রিজারেটরের দক্ষতা বা কর্মদক্ষতা যথা,

$$\eta = \frac{Q_1}{W} \le \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$ এখানে, T_1 = অপসারিত তাপমাত্রা এবং T_2 = বর্জিত তাপমাত্রা

তাপ ইঞ্জিন ও রেফ্রিজারেটরের মূলনীতির মধ্যে পার্থক্য :

- তাপ ইঞ্জিন উচ্চ তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে কার্য সম্পাদন করে এবং অব্যবহৃত তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে বর্জন করে।
- পক্ষান্তরে রেফ্রিজারেটর নিম্ন তাপমাত্রার উৎস থেকে তাপ গ্রহণ বা অপসারণ করে ও উচ্চ তাপমাত্রার আধারে বর্জন করে। এর জন্য বাইরে থেকে শক্তি সরবরাহ করতে হয়।

গানিতিক উদাহরণ ১.৭

১। একটি রেফ্রিজারেটরের কার্যকৃত সহগ K = 4·6। এটি ঠান্ডা প্রকোষ্ঠ হতে প্রতি চক্রে 250 J তাপ অপসারণ করলে (i) প্রতি চক্রে রেফ্রিজারেটর চালনার জন্য কী পরিমাণ কাজ সরবরাহ করতে হবে ? (ii) কী পরিমাণ তাপ প্রতি চক্রে বর্জন করবে ?

আমরা জানি,

(i) কার্যকৃত সহগ, $K = \frac{Q_1}{W}$

বা, $W = \frac{Q_1}{K}$

$\therefore\ W = \frac{250}{4 \cdot 6} J = 54 J$

(ii) আবার, $W = Q_2 - Q_1$

বা, $Q_2 = W + Q_1$ $\therefore\ Q_2 = 250 J + 54 J = 304 J$

উত্তর : W = 54 J এবং Q_2 = 304 J

এখানে,
K = 4·6
অপসারিত তাপ, Q_1 = 250 J
সরবরাহকৃত কাজ, W = ?
বর্জিত তাপ, Q_2 = ?

২। একটি রেফ্রিজারেটর —70°C তাপমাত্রার তাপাধার হতে 3500 J তাপ গ্রহণ করে এবং উচ্চতর তাপমাত্রার তাপাধারে 5200 J তাপ বর্জন করে। রেফ্রিজারেটরের কার্যকৃত সহগ নির্ণয় কর। তাপাধারের উচ্চতর তাপমাত্রা কত হবে ?

আমরা জানি,

$$K = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$\therefore\ K = \frac{3500}{5200 - 3500} = \frac{3500}{1700} = 2 \cdot 0588$$

এখানে,
Q_1 = 5200 J
Q_2 = 3500 J
K = ?
T_1 = ?
T_2 = − 70 + 273 = 203 K

আবার,

$$K = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

বা, $2 \cdot 0588 = \frac{203}{T_1 - 203}$

বা, $T_1 - 203 = \frac{203}{2 \cdot 0588} = 98 \cdot 60$

$\therefore\ T_1 = 301 \cdot 60\ K = 28 \cdot 60°C$

উত্তর : রেফ্রিজারেটরের কার্যকৃত সহগ 2·0588 এবং তাপাধারের উচ্চতর তাপমাত্রা 28·60°C

১.১২ এনট্রপি ও বিশৃঙ্খলা

Entropy and disorderliness

মনে কর তোমরা শ্রেণিকক্ষে ক্লাস করছ। তোমার পাশে বসা এক বন্ধু ক্লাস অনুসরণ না করে পাশের ছেলেদের বিভিন্নভাবে বিরক্ত করছে। আবার অন্য একজন বইখাতা ক্লাসে না এনে নানা রকম খেলনা সাথে করে এনে খেলা ...

ফেলবেন। ফলে শ্রেণিকক্ষে বিশৃঙ্খলার সৃষ্টি হবে। একইভাবে প্রকৃতিতে বেঁচে থাকার জন্য যতটুকু অক্সিজেন দরকার তার তুলনায় কম বা বেশি থাকলেও আমাদের শ্বাস-প্রশ্বাস নিতে কষ্ট হবে। তখন প্রকৃতিতে বিশৃঙ্খলা বৃদ্ধি পায়। উপরোক্ত দুই ক্ষেত্রেই বিশৃঙ্খলা বা এনট্রপি বৃদ্ধি পাচ্ছে। কোনো সিস্টেমের বিশৃঙ্খলার সূচক পরিমাপকে এনট্রপি বলে। ইংরেজিতে বলা হয় **"Entropy is a measure of disorderliness".**

আবার কোনো গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় সঙ্কুচিত করার সময় কিছু কাজ করা হয়। ফলে গ্যাসের তাপশক্তি এবং সেই সঙ্গে তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়। পুনরায় গ্যাসকে রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হতে দিলে গ্যাসকে কিছু কাজ করতে হয়। অন্তর্নিহিত শক্তির বিনিময়ে গ্যাস এই কাজ করে থাকে। ফলে গ্যাসের তাপশক্তি ও তাপমাত্রা এই দুটির একটিও স্থির থাকে না। উভয়ই একই সঙ্গে বৃদ্ধি পায় বা হ্রাস পায়।

বিজ্ঞানী **ক্লসিয়াস** তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগ করতে গিয়ে উপলব্ধি করেন যে, সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় যেমন বস্তুর তাপমাত্রা স্থির থাকে, তেমন রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর **'কোনো কিছু'** স্থির থাকে। রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর সঙ্গে যখন পরিপার্শ্বের কোনো তাপ আদান-প্রদান হয় না, তখন বস্তুর যে তাপীয় ধর্ম অপরিবর্তিত থাকে ক্লসিয়াস তার নাম দেন **এনট্রপি**। অতএব এনট্রপির নিম্নলিখিত সংজ্ঞা দেওয়া যেতে পারে :

রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর যে তাপীয় ধর্ম স্থির থাকে, তাকে এনট্রপি বলে। অন্যভাবে বলা হয়, **এনট্রপি হলো বস্তুর এমন একটি ভৌত ধর্ম যা রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় স্থির থাকে।** ***

এনট্রপি বস্তুর একটি ভৌত ধর্ম। তাপগতিবিজ্ঞানে এর গুরুত্ব অপরিসীম। এটি তাপগতীয় রাশিসমূহের এমন একটি অপেক্ষক যা তাপ প্রবাহের দিক বা তাপ সঞ্চালনের দিক নির্দেশ করে এবং তাপগতীয় অবস্থা নির্ধারণে সহায়তা করে। ইহা বস্তুর একটা ভৌত গুণ। একে তাপীয় জড়তা (thermal inertia) বলে। এনট্রপির পরম মান নির্ণয় করা যায় না, তবে কোনো সিস্টেমের এনট্রপি কত পরিবর্তন হলো তা নির্ণয় করা যায়।

তাপমাত্রা, আয়তন ও চাপের ন্যায় বস্তুর এনট্রপিও একটি প্রাকৃতিক রাশি। এর মান বস্তুর বর্তমান অবস্থার ওপর নির্ভর করে। তবে কোন পথে বস্তু ওই অবস্থায় পৌঁছল তার ওপর নির্ভর করে না অর্থাৎ কোনো নির্দিষ্ট অবস্থায় বস্তুর এনট্রপি বস্তুর পূর্ব ইতিহাসের ওপর নির্ভর করে না। **তাপ গ্রহণে বা বর্জনে বস্তুর এনট্রপি পরিবর্তিত হয়।**

কোনো একটি সংস্থা বা চক্রের তাপমাত্রা সাপেক্ষে গৃহীত বা বর্জিত তাপের পরিবর্তনের হার দ্বারা এনট্রপি পরিমাপ করা হয়।

মনে করি কোনো একটি ব্যবস্থা বা সিস্টেম T পরম তাপমাত্রায় dQ পরিমাণ তাপ গ্রহণ বা বর্জন করে। অতএব এনট্রপি

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.29)$$

একক : T-এর একক কেলভিন এবং dQ এর একক জুল।

অতএব এনট্রপির এস. আই. একক জুল/কেলভিন (JK^{-1})। ***

নিজে কর : রুদ্ধতাপীয় প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য হয় কেন ? [য. বো. ২০১৯]

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় দুটি রুদ্ধতাপ ও দুটি সমোষ্ণ প্রক্রিয়া থাকে। রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়া দুটির সময় কোনো তাপ শোষিত বা বর্জিত হয় না বলে এনট্রপিরও কোনো পরিবর্তন হয় না।

১.১২.১ এনট্রপির তাৎপর্য
Significance of entropy

তাপগতিবিদ্যায় এনট্রপির গুরুত্ব অপরিসীম। এর নিম্নলিখিত তাৎপর্য রয়েছে :

১। এনট্রপি একটি প্রাকৃতিক রাশি যার মান তাপ ও পরম তাপমাত্রার অনুপাতের সমান।

২। এটি বস্তুর একটি তাপীয় ধর্ম যা তাপ সঞ্চালনের দিক নির্দেশ করে।

৩। এটি বস্তুর তাপগতীয় অবস্থা নির্ধারণে সহায়তা করে।

৪। এটি তাপমাত্রা, চাপ, আয়তন, অন্তর্নিহিত শক্তি, চুম্বকীয় অবস্থার ন্যায় কোনো বস্তুর অবস্থা প্রকাশ করে।

৫। এনট্রপি বৃদ্ধি পেলে বস্তু শৃঙ্খল অবস্থা (ordered state) হতে বিশৃঙ্খল অবস্থায় (disordered state) পরিণত হয়।

৬। তাপমাত্রা ও চাপের ন্যায় একে অনুভব করা যায় না।

হিসাব কর : যখন 10g পানিকে 0°C থেকে 40°C তাপমাত্রায় উত্তপ্ত করা হয় তখন এনট্রপির পরিবর্তন কত হবে ?

১.১২.২ এনট্রপির মাধ্যমে তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের প্রকাশ
Formulation of the second law of thermodynamics in terms of entropy

ক্লসিয়াসের মতে তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র নিম্নরূপ :

বিশ্বের মোট শক্তি স্থির। একে শক্তির নিত্যতার সূত্রও বলা যায়।

ক্লসিয়াসের মতে তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র নিম্নরূপ :

বিশ্বের এনট্রপি ক্রমাগত বৃদ্ধি পাচ্ছে। একে এনট্রপি বৃদ্ধির সূত্রও বলা যায়। আমরা স্বাভাবিকভাবে এনট্রপির মাধ্যমে তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের সংজ্ঞা নিম্নলিখিতভাবে দিতে পারি।

সংজ্ঞা : প্রকৃতির সকল ভৌত অথবা রাসায়নিক ক্রিয়া এমনভাবে সংঘটিত হয় যার ফলে সার্বিক ব্যবস্থার এনট্রপি বৃদ্ধি পায়। সীমায়িত ক্ষেত্রে একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার এনট্রপি অপরিবর্তিত থাকে।

তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রকে গাণিতিকভাবে সংজ্ঞায়িত করার জন্য ধরা যাক একটি ব্যবস্থার প্রাথমিক ও চূড়ান্ত অবস্থা A ও B-তে এনট্রপির মান যথাক্রমে S_A এবং S_B। সুতরাং ব্যবস্থাটির এনট্রপির পরিবর্তন,

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.30)$$

যদি A ও B অবস্থা দুটি পরস্পর খুবই কাছাকাছি হয়, তবে লেখা যায়, $dS = \frac{dQ}{T}$

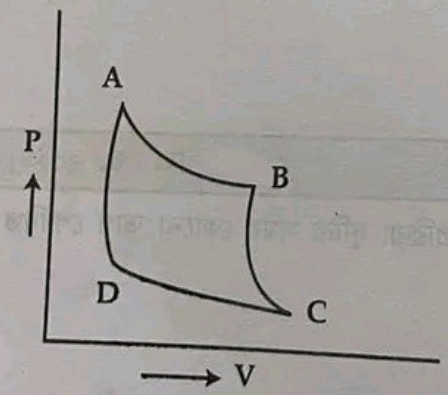
$$\therefore dQ = T\,dS \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (1.31)$$

এটিই তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের গাণিতিক সংজ্ঞা।

আমরা জানি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি বৃদ্ধি পায় এবং প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি স্থির থাকে। বিশ্ব জগতের অধিকাংশ প্রক্রিয়াই অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া। সুতরাং বলা যায় বিশ্বজগতের এনট্রপি ক্রমাগত বৃদ্ধি পাচ্ছে।

কাজ : প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি স্থির থাকে কেন—ব্যাখ্যা কর।

কার্নো চক্র একটি প্রত্যাগামী বা প্রত্যাবর্তী চক্র। কার্নো চক্র থেকে দেখা যায় যে, AB ও CD যথাক্রমে দুটি সমোষ্ণ সম্প্রসারণ ও সংকোচন রেখা [চিত্র ১·১৬]। অন্যদিকে BC ও DA যথাক্রমে দুটি রুদ্ধতাপীয় সম্প্রসারণ ও সংকোচন রেখা বলে তাপের কোনো পরিবর্তন হয় না, ফলে কার্যনির্বাহী বস্তুর এনট্রপির কোনো পরিবর্তন হয় না।



চিত্র ১·১৬

AB সমোষ্ণ রেখা বরাবর এনট্রপির পরিবর্তন $= \frac{Q_1}{T_1}$

CD সমোষ্ণ রেখা বরাবর এনট্রপির পরিবর্তন $= \frac{Q_2}{T_2}$

$\therefore$ কার্যনির্বাহক বস্তুর মোট এনট্রপির পরিবর্তন $= \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2}$

কিন্তু কার্নো চক্রে $= \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$

$\therefore$ মোট এনট্রপির পরিবর্তন $dS = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$

তাই প্রত্যাগামী বা প্রত্যাবর্তী চক্রে এনট্রপি স্থির থাকে।

যাচাই কর : অপ্রত্যাবর্তী বা অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এনট্রপি বৃদ্ধি পায় কেন—ব্যাখ্যা কর।

মনে করি, তাপ উৎসের তাপমাত্রা T_1K এবং তাপ গামলার তাপমাত্রা T_2K। একটি অপ্রত্যাবর্তক ইঞ্জিন T_1 তাপমাত্রায় Q_1 পরিমাণ তাপ শোষণ করে এবং T_2 তাপমাত্রায় Q_2 পরিমাণ তাপ বর্জন করে। তখন ওই ইঞ্জিনের কর্মক্ষমতা,

$$\eta' = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

কিন্তু T_1 এবং T_2 তাপমাত্রার মধ্যে কার্যত প্রত্যাবর্তক ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

অপ্রত্যা... : ...সম্ভাব্য সব প্রাকৃতিক উপায় সত্ত্বেও সমগ্র সংস্থাকে পুরোপুরি প্রাথমিক অবস্থায় ফিরিয়ে আনা যায় না বা যে প্রক্রিয়া বিপরীতমুখী হয়ে প্রত্যাবর্তন করতে পারে না তাকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বলে।

কার্নো চক্র : যে চক্রে কোনো একটি আদর্শ গ্যাস কার্যকরী পদার্থ হিসেবে একটি নির্দিষ্ট আয়তন, চাপ ও তাপমাত্রা হতে আরম্ভ করে একটি সমোষ্ণ প্রসারণ ও একটি রুদ্ধতাপ প্রসারণ এবং একটি সমোষ্ণ সংকোচন ও একটি রুদ্ধতাপ সংকোচনের পর পূর্বাবস্থায় ফিরে আসে, তাকে কার্নো চক্র বলে।

তাপীয় ইঞ্জিন : যে যন্ত্র তাপশক্তিকে যান্ত্রিক শক্তিতে রূপান্তরিত করে, তাকে তাপীয় ইঞ্জিন বলে।

হিমায়ন : কৃত্রিম উপায়ে কোনো আবদ্ধ স্থানকে পারিপার্শ্বিক অবস্থা হতে নিম্ন তাপমাত্রায় রাখার পদ্ধতিকে হিমায়ন বলে।

হিমায়ক : নিম্ন স্ফুটনাঙ্কের কোনো তরল পরিপার্শ্ব হতে লীনতাপ বা সুপ্ততাপ গ্রহণ করে পরিপার্শ্বকে শীতল করে তাকে হিমায়ক বলে।

রেফ্রিজারেটর : যে যন্ত্র যান্ত্রিক কাজ সম্পন্ন করে নিম্ন তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ অপসারণ করে উচ্চ তাপমাত্রার আধারে বর্জন করে তাকে রেফ্রিজারেটর বলে।

কার্যকৃত সহগ : রেফ্রিজারেটর হতে অপসারিত তাপ ও কম্প্রেসর কর্তৃক সরবরাহকৃত যান্ত্রিক কাজের অনুপাতকে কার্যকৃত সহগ বলে।

ইঞ্জিনের দক্ষতা : ইঞ্জিন একটি চক্রে যে পরিমাণ তাপকে কাজে পরিণত করে এবং তাপ উৎস হতে যে পরিমাণ তাপ শোষণ করে এদের অনুপাতকে ইঞ্জিনের দক্ষতা বলে।

এনট্রপি : রূদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় বস্তুর যে তাপীয় ধর্ম স্থির থাকে, তাকে এনট্রপি বলে।

বহুনির্বাচনি প্রশ্নের উত্তরের জন্য প্রয়োজনীয় বিষয়াবলির সারসংক্ষেপ

১। গ্যাসের অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ভর করে তাপমাত্রার ওপর।
২। উন্মুক্ত সিস্টেম পরিবেশের সাথে ভর ও শক্তি উভয়ই বিনিময় করে।
৩। তাপগতীয় বিচ্ছিন্ন সিস্টেমে ভর ও শক্তি কিছুই বিনিময় করতে পারে না।
৪। একটি গাড়ি চলতে থাকলে তার টায়ারের ভেতর রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া চলে।
৫। এন্ট্রপি বিশৃঙ্খলা নামক ভৌত ধর্মের পরিমাণ প্রদান করে।
৬। হিটারের মধ্য দিয়ে বিদ্যুৎ প্রবাহিত হলে তাপ উৎপন্ন হয়। ইহা একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।
৭। বন্ধ সিস্টেমে পরিবেশের সাথে শুধু শক্তি বিনিময় করে।
৮। প্রত্যাগামী প্রক্রিয়ায় এন্ট্রপি স্থির থাকে।
৯। স্থিতিস্থাপক সীমার মধ্যে স্প্রিংকে সংকুচিত ও প্রসারিত করা একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।
১০। তাপমাত্রা পরিমাপে উপযোগী পদার্থের যে সমস্ত ধর্ম নিয়মিতভাবে পরিবর্তিত হয় ওই ধর্মসমূহকে বলা হয় উষ্ণতামিতিক ধর্ম।
১১। তাপগতিবিদ্যার ১ম সূত্র শক্তির নিত্যতার সূত্র নির্দেশ করে।
১২। 1 cal তাপকে কাজে রূপান্তরিত করতে 4.2 J কাজ করতে হয়।
১৩। সকল প্রত্যাগামী প্রক্রিয়াই একমুখী।
১৪। অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় সিস্টেমের অণু-পরমাণুগুলোর এলোমেলো গতি বৃদ্ধি পায়।
১৫। তাপগতিবিদ্যার শূন্যতম সূত্রকে ভিত্তি করে থার্মোমিটার তৈরি করা হয়।
১৬। এনট্রপি সংরক্ষণশীলতার সূত্র মেনে চলে না।
১৭। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ার শর্ত হলো—(ক) গ্যাসের সংনমন ও প্রসারণ খুব ধীরে ধীরে সংঘটিত হবে (খ) পাত্রের চারপাশের মাধ্যমের তাপধারণ ক্ষমতা বেশি হতে হবে।
১৮। রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া সংঘটনের জন্য শর্ত হলো—
(ক) গ্যাসের পাত্র কুপরিবাহী হতে হবে।
(খ) চারপাশের মাধ্যমের তাপধারণ ক্ষমতা কম হতে হবে।
(গ) $\Delta Q = 0$; অর্থাৎ বাইরের সাথে গ্যাসের তাপের কোনো আদান-প্রদান ঘটে না।
(ঘ) চাপের পরিবর্তন খুব দ্রুত সংঘটিত হতে হবে।

১৯। তাপ এক প্রকার শক্তি যা কোনো বস্তুর ওপর প্রয়োগ করলে—
(১) বস্তুর উষ্ণতা বৃদ্ধি পায়
(২) বস্তুর আয়তন বৃদ্ধি পায়
(৩) অণুর গতিশক্তি বৃদ্ধি পায়।

২০। রেফ্রিজারেটরের জন্য প্রযোজ্য—নিম্ন তাপমাত্রার উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে উচ্চ তাপমাত্রার উৎসে তাপ বর্জন করে। পক্ষান্তরে তাপ ইঞ্জিন উচ্চ তাপমাত্রার উৎস হতে তাপ গ্রহণ করে কাজ সম্পাদন করে এবং অব্যবহৃত তাপ নিম্ন তাপমাত্রার তাপ গ্রাহকে বর্জন করে।

২১। প্লাজমা অবস্থায় এন্ট্রপি সবচেয়ে কম থাকে।

২২। যদি কোনো তাপ ইঞ্জিন থেকে তাপ বর্জিত না হয়, তবে ইঞ্জিনের ক্ষমতা 100% হবে।

২৩। সমচাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে $dW = P(V_2 - V_1)$।

২৪। তাপগতিবিদ্যার আলোকে $\Delta u = -W$, রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার ক্ষেত্রে প্রযোজ্য।

২৫। তাপগতীয় পরিবর্তন সাধারণত চার প্রকার। যথা—সমোষ্ণ পরিবর্তন, রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তন, সমআয়তন পরিবর্তন ও সমচাপ পরিবর্তন।

২৬। বায়ুর মধ্য দিয়ে শব্দ সঞ্চালন একটি রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া।

২৭। অভ্যন্তরীণ শক্তি নির্ভর করে আয়তন, চাপ এবং তাপমাত্রার ওপর। এই শক্তির পরিমাণ তাপীয় শক্তি + আণবিক স্থিতিশক্তি।

২৮। গ্যাসে দুইটি আপেক্ষিক তাপ থাকে C_P এবং C_V। n মোল গ্যাসের ক্ষেত্রে $C_P = \frac{\Delta Q}{n\Delta T}$ এবং $C_V = \frac{\Delta Q}{n\Delta T}$

২৯। এক-পরমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে $C_V = \frac{3R}{2}$। C_P এবং C_V এর পার্থক্য $C_P - C_V = R$.

৩০। এক পারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে, $\gamma = 1{\cdot}67$, দ্বিপারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে, $\gamma = 1{\cdot}40$ এবং বহু পারমাণবিক গ্যাসের ক্ষেত্রে $\gamma = 1{\cdot}33$।

৩১। গ্যাসীয় মাধ্যমে শব্দের বেগ γ এর মানের ওপর নির্ভর করে।

৩২। ঘর্ষণের ফলে তাপ উৎপাদন একটি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া। আবার চায়ের কাপে চিনি মেশানো একটি অপ্রত্যাগামী প্রক্রিয়া।

৩৩। তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রকে কাজে লাগিয়ে তাপীয় ইঞ্জিন ও রেফ্রিজারেটর তৈরি করা হয়।

৩৪। অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন = স্থির আয়তনে গ্যাসের আপেক্ষিক তাপ × পরম তাপমাত্রা।

৩৫। একটি কার্নো চক্রে মোট এনট্রপির পরিবর্তন শূন্য।

৩৬। ইঞ্জিনের দক্ষতা অর্ধেক করতে হলে উচ্চ তাপমাত্রা হ্রাস করতে হবে এবং নিম্ন তাপমাত্রা বৃদ্ধি করতে হবে।

৩৭। গ্যাসীয় অবস্থার এনট্রপি কঠিন ও তরলের চেয়ে বেশি।

৩৮। তাপ উৎস ও তাপ গ্রাহকের মধ্যবর্তী তাপমাত্রার মধ্যে পার্থক্য যত বেশি হবে ইঞ্জিনের দক্ষতাও তত বেশি হবে।

৩৯। পানির ত্রৈধবিন্দু 273·16 K। তাপগতীয় স্কেলকে তাপমাত্রার পরম স্কেল বলে।

৪০। $-40°C$ এবং $-40°F$ সেলসিয়াস ও ফারেনহাইট স্কেলে একই হয়।

৪১। কোনো সিস্টেমে তাপ প্রয়োগ না করলে অভ্যন্তরীণ শক্তি স্থির থাকে।

৪২। বিচ্ছিন্ন সিস্টেমে ভর বা শক্তি কিছুই বিনিময় হয় না।

৪৩। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসের চাপ ও আয়তনের সম্পর্ক বয়েলের সূত্র মেনে চলে। রুদ্ধতাপীয় পরিবর্তনের ক্ষেত্রে বয়েলের সূত্র প্রযোজ্য নয়।

৪৪। রুদ্ধতাপীয় লেখ সমোষ্ণ লেখ হতে অধিক খাড়া।

৪৫। প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় অভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তন শূন্য।

৪৬। কার্নো চক্র একটি প্রত্যাগামী চক্র।

৪৭। এনট্রপি রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় স্থির থাকে। এর একক জুল/কেলভিন (JK^{-1})।

৪৮। এনট্রপি তাপ সঞ্চালনের দিক নির্দেশ করে। অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায়