



ऊष्मा एवं ऊष्मागतिकी



1

ऊष्मा बनाम तापमान Heat vs Temperature



गर्म वस्तु
Hot body

ऊष्मा बहती है
Heat flows
→

ठंडी वस्तु
Cold body

- ऊष्मा = ऊर्जा का एक रूप; SI मात्रक जूल (J); 1 कैलोरी = 4.186 J
- तापमान = वस्तु के गर्म या ठंडे होने की माप; SI मात्रक केल्विन (K)
- ऊष्मा गर्म वस्तु से ठंडी वस्तु की ओर बहती है, चाहे दोनों में कुल ऊष्मा-मात्रा कुछ भी हो
- केल्विन की परिभाषा (2019 से) बोल्डज़मान स्थिरांक (1.380649×10^{-23} J/K) पर आधारित है
- जल का त्रिक बिंदु = 273.16 K (0.01°C)

2

तापमान पैमाने Temperature Scales



पैमाना Scale	हिमांक Freezing	क्वथनांक Boiling	अंतराल Divisions
सेल्सियस Celsius	0°	100°	100
फारेनहाइट Fahrenheit	32°	212°	180
केल्विन Kelvin	273.15	373.15	100
रोमर / रयूमर Réaumur	0°	80°	80

- सूत्र: $C/5 = (F-32)/9 = (K-273)/5 = R/4$
- 40° पर सेल्सियस और फारेनहाइट दोनों पैमानों का मान बराबर होता है
- परम शून्य = 0 K = -273.15°C = -459.67°F
- मानव शरीर का सामान्य तापमान = 37°C = 98.6°F

3

थर्मामीटर Thermometers



यंत्र	मुख्य तथ्य
पारा थर्मामीटर	पारे का हिमांक -39°C, क्वथनांक 357°C
अल्कोहल थर्मामीटर	हिमांक -115°C, क्वथनांक 78°C; बहुत कम तापमान के लिए
डॉक्टरी (क्लिनिकल)	परास 35°C-42°C (94°F-108°F); इसमें कसाव (constriction) होता है
प्लैटिनम प्रतिरोध	परास लगभग -200°C से 1200°C
ताप-युग्म (थर्मोकपल)	सीबेक प्रभाव पर आधारित
पायरोमीटर	बहुत उच्च तापमान (सूर्य, भट्टी); वस्तु से संपर्क आवश्यक नहीं

- सूर्य की सतह का तापमान $\approx 5500^\circ\text{C}$ (5778 K); केंद्र लगभग 1.5 करोड़ K

4

ऊष्मा की मात्रा (कैलोरीमिति) Quantity of Heat (Calorimetry)



बर्फ Ice $\xrightarrow{80 \text{ cal/g}}$ जल Water $\xrightarrow{540 \text{ cal/g}}$ भाप Steam

- $Q = mc\Delta T$; ऊष्माधारिता = mc; जल तुल्यांक = ऊष्माधारिता को जल की विशिष्ट ऊष्मा से भाग देने पर प्राप्त मान
- कैलोरीमिति का सिद्धांत: दी गई ऊष्मा = ली गई ऊष्मा
- जल की विशिष्ट ऊष्मा सबसे अधिक ($4200 \text{ J/kg}\cdot\text{K} = 1 \text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$) है
 - फलस्वरूप: समुद्री समीर, रेडिएटर में शीतलक के रूप में जल, तटीय क्षेत्रों में सम जलवायु
- गुप्त ऊष्मा ($Q = mL$): तापमान बदले बिना अवस्था परिवर्तन के समय ली या दी गई ऊष्मा
 - बर्फ की गलन की गुप्त ऊष्मा = 80 cal/g ($3.36 \times 10^5 \text{ J/kg}$)
 - जल की वाष्पन की गुप्त ऊष्मा = 540 cal/g ($2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$)
 - इसी कारण भाप से जलना उबलते जल से अधिक हानिकारक है

5 तापीय प्रसार Thermal Expansion



0°C
सिकुड़ता
Contracts



4°C
घनत्व अधिकतम
Max density



4°C से ऊपर
फैलता
Above 4°C expands

- रेखीय (α), क्षेत्रीय (β), आयतनी (γ) प्रसार गुणांक का अनुपात $\alpha : \beta : \gamma = 1 : 2 : 3$
- द्विधात्विक पट्टी (Bimetallic strip): थर्मोस्टेट, अग्नि-अलार्म में उपयोग
- जल का असामान्य प्रसार: 0°C से 4°C तक जल सिकुड़ता है; 4°C पर घनत्व अधिकतम
 - इसी कारण झील में ऊपर बर्फ जमने पर भी नीचे जलीय जीव सुरक्षित रहते हैं
- रेल पटरियों के बीच तथा पुलों में अंतराल तापीय प्रसार के लिए छोड़ा जाता है

6 अवस्था परिवर्तन के तथ्य Change of State: Key Facts



दाब बढ़ाएँ
Increase pressure



क्वथनांक बढ़ता
Boiling point rises

दाब बढ़ाएँ
Increase pressure



गलनांक घटता
Melting point falls

- दाब बढ़ाने पर क्वथनांक बढ़ता है (प्रेसर कुकर); पहाड़ों पर क्वथनांक घटता है
- दाब बढ़ाने पर गलनांक घटता है (बर्फ); इसी से पुनर्हिमायन (Regelation) और बर्फ पर स्केटिंग संभव
- ऊर्ध्वपातन (Sublimation): कपूर, नैफ्थलीन, आयोडीन, शुष्क बर्फ (ठोस CO_2), अमोनियम क्लोराइड
- वाष्पन सतह पर किसी भी तापमान पर होता है और शीतलता लाता है (पसीना, मटके का जल)
- आर्द्रता: आपेक्षिक आर्द्रता = $(\text{वास्तविक वाष्प दाब} \div \text{संतृप्त वाष्प दाब}) \times 100$; मापक हाइग्रोमीटर; ओसांक = वह तापमान जिस पर वायु संतृप्त होती है

7 ऊष्मा संचरण Modes of Heat Transfer



सूर्य
Sun

विकिरण · Radiation
 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$



पृथ्वी
Earth

विधि	माध्यम	मुख्य तथ्य
चालन	ठोस	कण स्थानांतरित नहीं होते; चांदी के बाद तांबा सर्वोत्तम चालक; द्रवों में पारा अच्छा चालक; ऊन, लकड़ी, वायु, काँच कुचालक
संवहन	द्रव व गैस	कण गति करते हैं; समुद्र/स्थल समीर, चिमनी, रोशनदान
विकिरण	माध्यम आवश्यक नहीं	गति प्रकाश के बराबर ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$); अवरक्त किरणें; सूर्य की ऊष्मा पृथ्वी तक इसी से

- श्याम पिंड (Black body): सर्वोत्तम अवशोषक व सर्वोत्तम उत्सर्जक; सफेद/चमकीली सतह सर्वोत्तम परावर्तक
- स्टीफन का नियम: $E = \sigma T^4$ (कुल विकिरण $\propto T^4$); $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- वीन का विस्थापन नियम: $\lambda_m \cdot T = \text{नियतांक}$ ($2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$); गर्म पिंड का रंग तरंगदैर्घ्य बदलने पर बदलता है
- किरचॉफ का नियम: अच्छा अवशोषक ही अच्छा उत्सर्जक
- न्यूटन का शीतलन नियम: शीतलन की दर $\propto$ (पिंड का ताप - परिवेश का ताप)
- थर्मस फ्लास्क (डीवार फ्लास्क, जेम्स डीवार): निर्वात, चाँदी की परत वाली दीवारें; तीनों संचरण विधियाँ रोकता है

8 गैस नियम Gas Laws



नियम	स्थिर राशि	संबंध
बॉयल	T	$PV = \text{नियतांक}$
चार्ल्स	P	$V \propto T$
गे-लुसैक	V	$P \propto T$
आवोगाद्रो	T, P	समान आयतन में समान अणु

- आदर्श गैस समीकरण: $PV = nRT$; $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; आवोगाद्रो संख्या = 6.022×10^{23}
- गतिज सिद्धांत: अणुओं की औसत गतिज ऊर्जा = $(3/2)kT$, जो केवल निरपेक्ष तापमान पर निर्भर है

9

ऊष्मागतिकी के नियम Laws of Thermodynamics



ΔQ
ऊष्मा • Heat



ΔU
आंतरिक ऊर्जा
Internal energy

+

W
कार्य • Work

नियम

कथन / महत्व

शून्यवाँ
(फाउलर)

दो निकाय किसी तीसरे के साथ तापीय साम्य में हों तो आपस में भी साम्य में होंगे; तापमान की अवधारणा

प्रथम

$\Delta Q = \Delta U + W$; ऊर्जा संरक्षण का नियम

द्वितीय

केल्विन-प्लांक: कोई चक्रीय इंजन सारी ऊष्मा को कार्य में नहीं बदल सकता। क्लॉसियस: ऊष्मा स्वतः ठंडे से गर्म की ओर नहीं बहती

तृतीय (नन्स्ट)

परम शून्य पर पूर्ण क्रिस्टल की एन्ट्रॉपी शून्य; परम शून्य प्राप्त करना असंभव

10

ऊष्मागतिक प्रक्रम Thermodynamic Processes



प्रक्रम

शर्त

परिणाम

समतापीय

T स्थिर

$\Delta U = 0$

रुद्धोष्म

$Q = 0$

ऊष्मा का आदान-प्रदान नहीं

समदाबी

P स्थिर

—

समआयतनिक

V स्थिर

$W = 0$

11

गैसों की विशिष्ट ऊष्माएँ Specific Heats of Gases

 γ

एकपरमाणुक
Monoatomic
 $\gamma = 5/3$

द्विपरमाणुक
Diatomic
 $\gamma = 7/5$

बहुपरमाणुक (अरैखिक)
Polyatomic
 $\gamma = 4/3$

- मेयर संबंध: $C_p - C_v = R$; $\gamma = C_p/C_v$
- γ : एकपरमाणुक = $5/3$ (1.67), द्विपरमाणुक = $7/5$ (1.4), बहुपरमाणुक (अरैखिक) = $4/3$

12

ऊष्मा इंजन और प्रशीतक Heat Engines and Refrigerators



कार्नो चक्र • Carnot cycle

समतापीय
प्रसार
Isothermal
expansion



रुद्धोष्म प्रसार
Adiabatic
expansion



समतापीय
संपीडन
Isothermal
compression



रुद्धोष्म
संपीडन
Adiabatic
compression

- कार्नो इंजन (सादी कार्नो, 1824): 2 समतापीय + 2 रुद्धोष्म प्रक्रम; आदर्श इंजन
- दक्षता $\eta = 1 - T_2/T_1$ (तापमान केल्विन में); 100% दक्षता असंभव
- प्रशीतक का निष्पादन गुणांक (COP) = $T_2/(T_1 - T_2)$
- ओटो चक्र: पेट्रोल इंजन; डीजल चक्र: डीजल इंजन
- वाष्प इंजन को व्यावहारिक रूप देने वाले जेम्स वाट (पहले न्यूकॉमेन ने बनाया था)
- एन्ट्रॉपी: अव्यवस्था की माप; मात्रक J/K; ब्रह्मांड की एन्ट्रॉपी सदैव बढ़ती है
- जूल: ऊष्मा का यांत्रिक तुल्यांक $J = 4.18 \text{ J/cal}$
- काउंट रम्फोर्ड: तोप की नली की बोरिंग से यह दिखाया कि ऊष्मा गति का परिणाम है



Heat & Thermodynamics



1

Heat vs Temperature

ऊष्मा बनाम तापमान



गर्म वस्तु
Hot body

ऊष्मा बहती है
Heat flows
→

ठंडी वस्तु
Cold body

- **Heat** = form of energy; SI unit joule (J) ; 1 calorie = 4.186 J
- **Temperature** = measure of hotness or coldness; SI unit kelvin (K)
- Heat flows from a hotter body to a colder body , regardless of how much total heat each holds
- **Kelvin** has been defined (since 2019) through the Boltzmann constant (1.380649×10^{-23} J/K)
- **Triple point** of water = 273.16 K (0.01°C)

2

Temperature Scales

तापमान पैमाने



पैमाना Scale	हिमांक Freezing	क्वथनांक Boiling	अंतराल Divisions
सेल्सियस Celsius	0°	100°	100
फारेनहाइट Fahrenheit	32°	212°	180
केल्विन Kelvin	273.15	373.15	100
रोमर / रयूमर Réaumur	0°	80°	80

- **Formula:** $C/5 = (F-32)/9 = (K-273)/5 = R/4$
- -40° reads the same on Celsius and Fahrenheit scales
- **Absolute zero** = 0 K = -273.15°C = -459.67°F
- Normal human body temperature = 37°C = 98.6°F

3

Thermometers

थर्मामीटर



Instrument	Key facts
Mercury	Mercury freezes at -39°C , boils at 357°C
Alcohol	Freezes at -115°C, boils at 78°C; used for <u>very low temperatures</u>
Clinical	Range 35°C-42°C (94°F-108°F); has a constriction
Platinum resistance	Range about -200°C to 1200°C
Thermocouple	Based on the Seebeck effect
Pyrometer	Measures <u>very high temperatures</u> (Sun, furnaces); no contact needed

- **Sun's** surface temperature $\approx$ 5500°C (5778 K) ; core about 15 million K

4

Quantity of Heat (Calorimetry)

ऊष्मा की मात्रा (कैलोरीमिति)



बर्फ
Ice

80 cal/g
→

जल
Water

540 cal/g
→

भाप
Steam

- **$Q = mc\Delta T$** ; heat capacity = mc; **water equivalent** = heat capacity ÷ specific heat of water
- **Principle of calorimetry:** heat lost = heat gained
- Water has the highest specific heat among common substances ($4200 \text{ J/kg}\cdot\text{K} = 1 \text{ cal/g}\cdot\text{°C}$)
 - Results: sea breeze, water as coolant in radiators, moderate coastal climate
- **Latent heat** ($Q = mL$): heat absorbed or released during a change of state at constant temperature
 - Latent heat of fusion of ice = 80 cal/g ($3.36 \times 10^5 \text{ J/kg}$)
 - Latent heat of vaporisation of water = 540 cal/g ($2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$)
 - Hence **steam burns** are more severe than boiling-water burns

5

Thermal Expansion

तापीय प्रसार



0°C
सिकुड़ता
Contracts



4°C
घनत्व अधिकतम
Max density



4°C से ऊपर
फैलता
Above 4°C expands

- Coefficients of linear (α), area (β) and volume (γ) expansion are in the ratio $\alpha : \beta : \gamma = 1 : 2 : 3$
- Bimetallic strip: used in thermostats and fire alarms
- Anomalous expansion of water: water contracts from 0°C to 4°C; density is maximum at 4°C
 - This is why aquatic life survives below the ice layer in frozen lakes
- Gaps are left in railway tracks and bridges to allow for thermal expansion

6

Change of State: Key Facts

अवस्था परिवर्तन के तथ्य



दाब बढ़ाएँ
Increase pressure



क्वथनांक बढ़ता
Boiling point rises

दाब बढ़ाएँ
Increase pressure



गलनांक घटता
Melting point falls

- Boiling point rises with pressure (pressure cooker); it falls at high altitudes
- Melting point of ice falls with pressure; this explains regelation and ice skating
- Sublimation: camphor, naphthalene, iodine, dry ice (solid CO_2), ammonium chloride
- Evaporation occurs from the surface at any temperature and causes cooling (sweating, earthen pot)
- Humidity: relative humidity = $(\text{actual vapour pressure} \div \text{saturated vapour pressure}) \times 100$; measured by a hygrometer; dew point = temperature at which air becomes saturated

7

Modes of Heat Transfer

ऊष्मा संचरण



सूर्य
Sun

विकिरण · Radiation
 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$



पृथ्वी
Earth

Mode	Medium	Key facts
Conduction	Solids	Particles do not move; <u>silver is the best conductor</u> , then copper; <u>mercury</u> is a good conductor among liquids; wool, wood, air and glass are poor conductors
Convection	Liquids and gases	Particles move; sea/land breeze, chimney, ventilators
Radiation	No medium needed	Travels at the speed of light ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$); <u>infrared rays</u> ; the Sun's heat reaches Earth this way

- Black body: best absorber and best emitter; white/shiny surface is the best reflector
- Stefan's law: $E = \sigma T^4$ (total radiation $\propto T^4$); $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- Wien's displacement law: $\lambda_m \cdot T = \text{constant}$ ($2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$)
- Kirchhoff's law: a good absorber is also a good emitter
- Newton's law of cooling: rate of cooling $\propto$ (body temperature – surroundings temperature)
- Thermos flask (Dewar flask, James Dewar): vacuum, silvered walls; stops all three modes of transfer

8

Gas Laws

गैस नियम



Law	Constant	Relation
Boyle	T	$PV = \text{constant}$
Charles	P	$V \propto T$
Gay-Lussac	V	$P \propto T$
Avogadro	T, P	Equal volumes contain equal numbers of molecules

- Ideal gas equation: $PV = nRT$; $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; Avogadro number = 6.022×10^{23}
- Kinetic theory: average kinetic energy per molecule = $(3/2)kT$, depending only on absolute temperature

9

Laws of Thermodynamics

ऊष्मागतिकी के नियम



ΔQ
ऊष्मा · Heat



ΔU
आंतरिक ऊर्जा
Internal energy

+

W
कार्य · Work

Law

Statement / Significance

Zeroth
(Fowler)

If two systems are each in thermal equilibrium with a third, they are in equilibrium with each other; gives the concept of **temperature**

First

$\Delta Q = \Delta U + W$; law of **conservation of energy**

Second

Kelvin-Planck: no cyclic engine can convert all heat into work. **Clausius**: heat does not flow spontaneously from cold to hot

Third
(Nernst)

Entropy of a perfect crystal is zero at absolute zero; **absolute zero cannot be reached**

10

Thermodynamic Processes

ऊष्मागतिक प्रक्रम



Process

Condition

Result

Isothermal

T constant

$\Delta U = 0$

Adiabatic

$Q = 0$

No heat exchange

Isobaric

P constant

—

Isochoric

V constant

$W = 0$

11

Specific Heats of Gases

गैसों की विशिष्ट ऊष्माएँ

γ

एकपरमाणुक
Monoatomic
 $\gamma = 5/3$

द्विपरमाणुक
Diatomic
 $\gamma = 7/5$

बहुपरमाणुक (अरैखिक)
Polyatomic
 $\gamma = 4/3$

- **Mayer's relation**: $C_p - C_v = R$; $\gamma = C_p/C_v$
- γ : monoatomic = $5/3$ (1.67), diatomic = $7/5$ (1.4), polyatomic (non-linear) = $4/3$

12

Heat Engines and Refrigerators

ऊष्मा इंजन और प्रशीतक



कार्नो चक्र · Carnot cycle

समतापीय
प्रसार
Isothermal
expansion



रुद्धोष्म प्रसार
Adiabatic
expansion



समतापीय
संपीड़न
Isothermal
compression



रुद्धोष्म
संपीड़न
Adiabatic
compression

- **Carnot engine** (Sadi Carnot, 1824): 2 isothermal + 2 adiabatic processes; an ideal engine
- **Efficiency** $\eta = 1 - T_2/T_1$ (temperatures in kelvin); 100% efficiency is impossible
- **Coefficient of performance (COP)** of a refrigerator = $T_2/(T_1 - T_2)$
- **Otto cycle**: petrol engine; **Diesel cycle**: diesel engine
- **James Watt** made the steam engine practical (Newcomen built the earlier one)
- **Entropy**: measure of disorder; unit J/K ; entropy of the universe always increases
- **Joule**: mechanical equivalent of heat $J = 4.18 J/cal$
- **Count Rumford**: showed from cannon-boring experiments that heat is a result of motion