इकाई 3 ऊष्मागतिकी का प्रथम नियम

इकाई की रूपरेखा

3.1 प्रस्तावना
उद्देश्य
3.2 ऊष्मा
ऊष्मा की प्रकृति
3.3 कार्य
आंतरिक और बाह्य कार्य
3.4 कार्य के व्यंजक
गैसीय तंत्र
अन्य तंत्र
3.5 कार्य और ऊष्मा की पथ-निर्भरता
3.6 आंतरिक ऊर्जा
3.7 ऊष्मागतिकी का प्रथम नियम
प्रथम नियम का अवकल रूप
3.8 सारांश
3.9 अंत में कुछ प्रश्न
3.10 हल और उत्तर
3.11 शब्दावली

3.1 प्रस्तावना

पिछली इकाई में आपने ताप-मापन के बारे में पढ़ा। आप यह जानते हैं कि ऊष्मा-विनियम के कारण ही तंत्र के ताप में परिवर्तन होता है। अब प्रश्न उठता है कि इस ऊष्मा की प्रकृति क्या है? यह प्रश्न लंबे समय तक वैज्ञानिकों के लिए एक पहेली बना रहा। इस प्रश्न तथा इससे संबंधित अनेक प्रश्नों के उत्तर ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम से प्राप्त हो जाते हैं, जिसके बारे में हम इस इकाई में अध्ययन करेंगे।

अनंत काल से हमारे आस-पास जो कुछ होता रहा है उसमें ऊर्जा का ही प्रभुत्व रहा है। जब प्राचीन काल के लोगों ने तीर चलाना या आग जलाना सीखा, तब वे यह नहीं जानते थे कि वे अलग-अलग रूपों में ऊर्जा ही ख़र्च कर रहे हैं। अब हम जानते हैं कि ये क्रमशः प्रत्यास्थ स्थितिज ऊर्जा और रासायनिक ऊर्जा हैं। तब से हमने इस दिशा में काफी दूरी तय कर ली है। ऊर्जा संरक्षण नियम के कथन की व्यापक सत्यता जानने के बाद हम यह अनुभव करने लगे हैं कि मनुष्य के जीवन में ऊर्जा का काफी अधिक महत्व है। ऊष्मागतिकी का प्रथम नियम इस नियम का ही एक विस्तार है।

इस इकाई में पहले हम ऊष्मा की प्रकृति के बारे में चर्चा करेंगे। इसके बाद हम कार्य के बारे में ऊष्मागतिक दृष्टि से अध्ययन करेंगे। अध्ययन के दौरान आप देखेंगे कि संपीड़ित या विस्तारित गैस, तनित तार या चुंबकीकृत अनुचुंबकीय पदार्थ में कार्य निष्पादित होता है।

इसके बाद आप पढ़ेंगे कि कार्य और ऊष्मा एक दूसरे में रूपांतरित हो सकते हैं, अतः ये दोनों ऊर्जा के ही रूप हैं। सभी इंजन इसी नियम के आधार पर कार्य करते हैं। इस इकाई में आप कार्य और ऊष्मा के अतिरिक्त अन्य महत्त्वपूर्ण फलनों के बारे में भी अध्ययन करेंगे। एक महत्त्वपूर्ण फलन है पिंड की आंतरिक ऊर्जा (internal energy)। इस फलन की परिभाषा से हमें ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम का औपचारिक कथन प्राप्त होता है। कुछ सरल उदाहरणों की सहायता से हम इस नियम की विवेचना करेंगे। अंत में आप इसके आधारभूत महत्त्व के बारे में जानकारी प्राप्त करेंगे।

अगली इकाई में हम ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम के कुछ महत्त्वपूर्ण अनुप्रयोगों के बारे में चर्चा करेंगे।

उद्देश्य

इस इकाई का अध्ययन कर लेने के बाद आप :

- ऊष्मा की प्रकृति की व्याख्या कर सकेंगे
- कार्य की ऊष्मागतिक संकल्पना की व्याख्या कर सकेंगे
- अनेक ऊष्मागतिक तंत्रों द्वारा/पर किये गए कार्य के व्यंजक मालूम कर सकेंगे
- आंतरिक ऊर्जा परिभाषित कर सकेंगे

● ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम का महत्त्व समझ सकेंगे।

3.2 ऊष्मा (Heat)

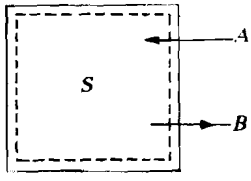
अपने अनुभव से हम यह जानते हैं कि गर्मी के मौसम में मेज पर रखा ठण्डे पानी का गिलास स्वतः गर्म होने लगता है। उसी मेज पर रखा गर्म चाय का प्याला धीरे-धीरे ठण्डा होने लगता है। इससे यह अर्थ निकलता है कि जब किसी तंत्र और उसके परिवेश (surroundings) का तापमान अलग-अलग होता है तो तंत्र और उसके परिवेशी माध्यम (surrounding medium) में ऊर्जा विनिमय होता है। यह प्रक्रिया तब तक चलती है जब तक कि तापीय साम्य (thermal equilibrium) स्थापित नहीं हो जाता। अर्थात् ऊर्जा का स्थानांतरण तब तक होता रहता है जब तक कि पिंड और परिवेशी माध्यम के तापमान एक समान नहीं हो जाते। हम यह भी जानते हैं कि ऊर्जा परिवेश से गिलास की ओर प्रवाहित होती है जबकि दूसरी स्थिति में ऊर्जा प्याले से परिवेश की ओर प्रवाहित होती है। दूसरे शब्दों में हम कह सकते हैं कि ऊर्जा-स्थानांतरण सदैव उच्च ताप वाले पिंड से निम्न ताप वाले पिंड की ओर होता है। अब आप का प्रश्न यह हो सकता है कि ऊर्जा किस रूप में स्थानांतरित होती है? उपर्युक्त स्थितियों में यह कहा जा सकता है कि ऊर्जा ऊष्मा के रूप में स्थानांतरित होती है। अतः हम यह कह सकते हैं कि **ऊष्मा, तापांतर (temperature difference) के कारण दो (या अधिक) तंत्रों के बीच या किसी तंत्र और उसके परिवेश के बीच स्थानांतरित ऊर्जा (energy-in-transit) के रूप में होती है।** उच्च ताप वाले तंत्र को **स्रोत** (source) कहा जाता है और निम्न ताप वाले तंत्र को **अभिगम** (sink) कहा जाता है। अब प्रश्न उठता है कि इस रूप में ऊर्जा की प्रकृति क्या होती है? आइए अब इसकी विस्तार से चर्चा करें।

3.2.1 ऊष्मा की प्रकृति

उन्नीसवीं शताब्दी के प्रारंभ तक यह समझा जाता था कि प्रत्येक पिंड में ऊष्मा एक भौतिक पदार्थ कैलोरिक (caloric) के रूप में अंतर्निहित होती है। ऐसा विश्वास किया जाता था कि निम्न ताप वाले पिंड की अपेक्षा उच्च ताप वाले पिंड में अधिक कैलोरिक होता है। यह भी मत था कि जब एक गर्म पिंड को एक ठण्डे पिंड के संपर्क में रखा जाता है तो गर्म पिंड से ठण्डे पिंड की ओर कैलोरिक तब तक स्वतः प्रवाहित होता है जब तक कि वे तापीय साम्य में नहीं आ जाते।

पर, कुछ वैज्ञानिक विशेष रूप से काउन्ट रम्फॉर्ड और सर हम्फ्री डेवी इस विचार से सहमत नहीं थे। डेवी ने सिद्ध कर दिखाया कि बर्फ के दो टुकड़ों को रगड़कर पानी प्राप्त किया जा सकता है। अब, प्रश्न उठता है कि हम इसकी व्याख्या कैलोरिक संकल्पना के आधार पर कैसे कर सकते हैं? कैलोरिक सिद्धान्त के आधार पर पानी की तुलना में बर्फ में कम कैलोरिक होना चाहिए लेकिन बर्फ के टुकड़ों को रगड़ने पर बर्फ से कैलोरिक का निष्पीड़न होता है तथा घर्षण से प्राप्त पानी में बर्फ की अपेक्षा कम कैलोरिक होना चाहिए। यह तथ्य कैलोरिक सिद्धांत का अंतर्विरोध करता है। अतः यह अनुभव किया गया कि कैलोरिक सिद्धांत तर्कसंगत नहीं है और किसी अन्य सिद्धांत का पता लगाया जाए। अंततः 1840 में ऊष्मा और यांत्रिक कार्य की तुल्यता पर किये गए जूल के कार्य से वांछित सिद्धांत प्राप्त हुआ। जूल के प्रयोग में सिलेंडर में भरे पानी में जब पीतल का पैडल हिलाया गया तो ऊष्मा पैदा हुई। इससे यह अर्थ निकलता है कि पैडलों की यांत्रिक ऊर्जा ऊष्मा में रूपांतरित हो गई। ऊष्मा जल-अणुओं की अस्त-व्यस्त गति से उत्पन्न होती है। इस तरह, यह निष्कर्ष निकाला जा सका कि अणु-गति (molecular motion) का ऊष्मा से संबंध है।

यहां इस बात की ओर आपने अवश्य ध्यान दिया होगा कि हम अपने दैनिक जीवन में, प्रायः कहते रहते हैं कि गर्म चाय के कप में ऊष्मा है तथा सूर्य में काफी ऊष्मा है। अब हम "ऊष्मा" शब्द का प्रयोग केवल तभी करेंगे जबकि यह तंत्र की परिसीमा (boundary) को पार कर जाती हो। अतः 'पिंड में ऊष्मा' कहना सही नहीं है। भाग 3.6 में आप यह देखेंगे कि जब हम पिंड में ऊष्मा कहते हैं तो हमारा मतलब उसकी आंतरिक ऊर्जा (internal energy) से होता है। आंतरिक ऊर्जा और ऊष्मा दो अलग-अलग चीजें हैं। इस भेद के बारे में अध्ययन आप इस इकाई में ही करेंगे।



चित्र 3.1 : ऊष्मा की चिन्ह परिपाटी। यहां S तंत्र है। A के लिए ऊष्मा S में प्रवाहित होती है और यह धनात्मक है। B के लिए ऊष्मा B से बाहर की ओर प्रवाहित होती है और यह ऋणात्मक है।

क्योंकि ऊष्मा एक दिष्ट राशि (directional quantity) है, इसलिए इसे निरूपित करने के लिए हम एक चिन्ह-परिपाटी (sign convention) अपनाते हैं। तंत्र की ओर ऊष्मा स्थानांतरित हो रही हो तो उसे धनात्मक माना जाता है और तंत्र से निकल रही ऊष्मा को ऋणात्मक माना जाता है (चित्र 3.1)। आपने भाग 1.3.3 में यह देखा कि किसी प्रक्रिया के लिए ऊष्मा स्थानांतरण ऐसा हो सकता है कि न तो यह धनात्मक हो और न ही ऋणात्मक अर्थात् वह शून्य हो। ऐसी प्रक्रिया को रुद्धोष्म (adiabatic) कहा जाता है।

आइए अब हम ऊपर की गई चर्चा पर आधारित एक उदाहरण लें।

उदाहरण 1

शुरू में आलू कमरे के तापमान (30 °C) पर है। इसे 200 °C पर ओवन (oven) में पकाया जाता है। आलू को एक तंत्र मानकर बताइए कि क्या इस प्रक्रिया में कोई ऊष्मा स्थानांतरित होती है?

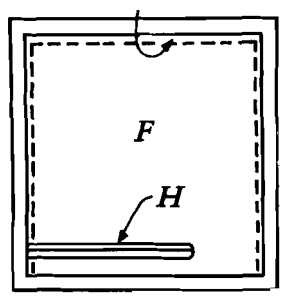
हल

आलू के छिलके को तंत्र की परिसीमा माना जा सकता है। ओवन और आलू के ताप में अंतर होने के कारण ओवन की ऊर्जा का एक अंश ऊष्मा के रूप में छिलके से होते हुए आलू में चला जाएगा।

अब आप निम्नलिखित बोध प्रश्न को हल करें।

बोध प्रश्न 1

एक ऊष्मारोधी (insulated) भट्टी F को उसके तापन अवयव (heating element) H से गर्म किया जा रहा है जैसा कि चित्र 3.2 में दिखाया गया है। यदि पूरी भट्टी को, जिसमें तापन अवयव भी शामिल है, एक तंत्र माना जाए, तो क्या आप यह कह सकते हैं कि ऊष्मा स्थानांतरण हो रहा है?



चित्र 3.2

बोध प्रश्न 1 के उत्तर से इस बात की ओर आपने अवश्य ध्यान दिया होगा कि ऊष्मा के अतिरिक्त अन्य रूप में भी तंत्र-परिसीमा से ऊर्जा स्थानांतरित हो सकती है। ऊर्जा के इस रूप को कार्य (work) कहा जाता है। अब हम इस पर चर्चा करेंगे।

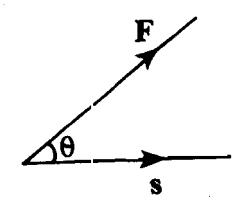
3.3 कार्य

जब ऊर्जा एक तंत्र की परिसीमा को पार करती हो और यह ऊष्मा के रूप में न हो, तो यह कार्य होगा। यदि तंत्र और उसके परिवेश के तापांतर के कारण ऊर्जा का स्थानांतरण हो रहा हो तो ऊर्जा के इस रूप को ऊष्मा कहते हैं। अतः हम यह कह सकते हैं कि यदि तंत्र और उसके परिवेश के तापांतर के कारण ऊर्जा की परस्पर क्रिया (interaction) नहीं हो रही हो, तो ऊर्जा का यह रूप कार्य होता है।

आपने अपने विद्यालय के विज्ञान पाठ्यक्रम में यह अवश्य पढ़ा होगा कि यांत्रिकी (mechanics) की दृष्टि से कार्य को किया हुआ तब कहा जाता है जबकि बल का अनुप्रयोग-बिन्दु (point of application) अर्थात् वह स्थान जहाँ बल लगाया जा रहा है, गतिमान हो जाए। इसे बल के परिमाण (magnitude) और बल की दिशा में अनुप्रयोग-बिन्दु के विस्थापन के प्रक्षेप (projection) के गुणनफल से मापा जाता है। जैसा कि आप जानते हैं, कार्य का व्यंजक

$$W = \mathbf{F}.\mathbf{s} = Fs\cos\theta$$

होता है (चित्र 3.3 देखिए)। ऊष्मागतिकी में कार्य की परिभाषा देने के लिए हम ऊपर दिए गए तर्क को ही अपनाते हैं। मगर यहां हम कार्य का वर्गीकरण करते हैं, जैसा कि अभी आप देखेंगे।



चित्र 3.3 : कार्य = $Fs\cos\theta$

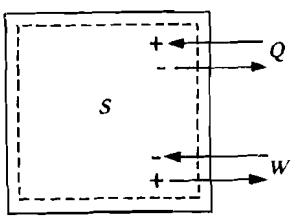
3.3.1 आंतरिक और बाह्य कार्य

यदि संपूर्ण तंत्र अपने परिवेश पर बल लगायें और बल लगाने से तंत्र का विस्थापन हो, तो तंत्र द्वारा या तंत्र पर किए गए कार्य को **बाह्य कार्य** (external work) कहा जाता है। यदि एक समान दाब पर सिलिंडर में भरी हुई गैस

फैलती है, और इससे पिस्टन गतिमान हो जाता है तो यह अपने परिवेश पर बाह्य कार्य करती है। दूसरी तरफ, तंत्र के एक भाग द्वारा दूसरे भाग पर किए गए कार्य को **आंतरिक कार्य** (internal work) कहा जाता है।

ऊष्मागतिकी में आंतरिक कार्य का कोई महत्व नहीं है। ऊष्मागतिकी में जब कार्य के बारे में कुछ कहते हैं तो इसका अर्थ हमेशा बाह्य कार्य होता है। आइए इस संबंध में हम एक उदाहरण लें। मान लीजिए एक चूहा सीढ़ी पर चढ़ रहा है। सैद्धान्तिक रूप में यह कुछ कार्य कर रहा है। वास्तव में इस कार्य को करने के लिए चूहा अपनी जैव रसायन (bio-chemical) ऊर्जा का इस्तेमाल करता है। अतः यह एक आंतरिक कार्य है। दूसरे शब्दों में, ऊष्मागतिकी के अनुसार चूहे ने कोई कार्य नहीं किया है। इसी प्रकार यदि संचायक बैटरी काम न कर रही हो, तो सेल में हो रहे परिवर्तन, जैसे रसायनों का अन्योन्य विसरण (inter-diffusion) से कोई कार्य नहीं होता। पर यदि सेल को एक बाह्य परिपथ से जोड़ दिया जाए, तो उस परिपथ में धारा प्रवाहित होने लगेगी और इसके द्वारा एक बल्ब जलाया जा सकता है। अतः वैद्युत सेल कार्य के लिए यह आवश्यक है कि उसे एक बाह्य परिपथ से जोड़ा जाए।

तंत्र द्वारा किए गए कार्य को वांछित प्रभाव (desirable effect) और तंत्र पर किये गए कार्य को अवांछित प्रभाव (undesirable effect) माना जाता है। अतः इस संबंध में निम्नलिखित परिपाटी (convention) अपनायी जाती है। तंत्र द्वारा किया गया कार्य धनात्मक माना जाता है और तंत्र पर किया गया कार्य ऋणात्मक माना जाता है। इस परिपाटी के अनुसार कार, इंजन या गैस टरबाइन द्वारा किया गया कार्य धनात्मक है और संपीडक (compressor) या मिक्सर द्वारा किया गया कार्य ऋणात्मक होता है। हमने ऊष्मा और कार्य की चिन्ह परिपाटी (sign convention) को चित्र 3.4 में निरूपित किया है।



चित्र 3.4 : S तंत्र है। ऊष्मा निवेश राशि जमा (deposit) करने के रूप में है और कार्य-निर्गम (work output) राशि निकालने (withdrawal) के रूप में है।

ऐसे अनेक प्रकार के बल हैं जो तंत्र पर कार्य कर सकते हैं। इनका अध्ययन करने से पहले आप एक बोध प्रश्न हल करना चाहेंगे। (इस बोध प्रश्न की लंबाई को देखकर परेशान न होइए। वस्तुतः यह सरल है।)

बोध प्रश्न 2

कोष्ठक में दिए गए शब्दों में से उपयुक्त शब्द लेकर नीचे दिए गए खाली स्थान भरिए।

(विस्थापन, बल, जड़त्व, ऋणात्मक, धनात्मक, कार्य)

क) ..... तंत्र द्वारा किया गया कहा जाता है और ..... माना जाता है। यदि यह परिवेश पर नेट ..... लगाता हो, जिसकी वजह से ..... होता है।

ख) बताइए कि निम्नलिखित प्रक्रिया में कोई कार्य किया गया है कि नही :

i) एक चुंबक को धारा प्रवाहित हो रहे एक वैद्युत परिपथ के निकट लाया गया है। चुंबक के अंदर वेबर अवयवों (weber elements) के पुनर्संरेखम (realignment) से चुंबकीकरण में एक परिवर्तन होता है।

ii) धारा प्रवाहित करके गैल्वनोमीटर कुंडली को गतिमान बना दिया जाता है।

ग) ऐसे कार्य के चिन्ह क्या हैं जिसे (i) हम भाप इंजन से प्राप्त करते हैं, (ii) पंप से जुड़े विद्युत मोटर पर किया जाता है।

3.4 कार्य के व्यंजक

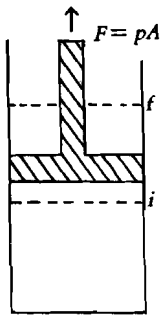
ऊष्मागतिकी में हम कार्य को तंत्र के अवस्था-चर (state variables) के रूप में व्यक्त करते हैं। ऐसा करने से गणितीय दृष्टि से विश्लेषण सरल हो जाता है। इसे प्राप्त करने के लिए हमें यह सुनिश्चित करना पड़ता है कि तंत्र सदा ही लगभग साम्यावस्था में रहे अर्थात् संबंधित प्रक्रिया स्थैतिककल्प (quasi-static) होती है। इस बात को ध्यान में रखकर अब हम विभिन्न तंत्रों में किए गए कार्य के व्यंजक प्राप्त करेंगे।

3.4.1 गैसीय तंत्र

मान लीजिए घर्षणहीन पिस्टन लगे एक सिलिंडर में द्रव्यमान M वाली गैस भरी है तथा पिस्टन पर तंत्र और परिवेश दोनों ही कार्य कर सकते हैं (चित्र 3.5)। मान लीजिए कि पिस्टन का अनुप्रस्थ परिच्छेद क्षेत्रफल A है। यदि किसी क्षण पर तंत्र द्वारा पिस्टन पर लगाया गया दाब p हो, तो इस पर बल pA होगा। इस बल के कारण पिस्टन बाहर की ओर जाता है। यदि बल की दिशा में पिस्टन, dx की दूरी तक जाता हो तो हम तंत्र द्वारा किए गए कार्य को इस रूप में लिख सकते हैं :

$$\delta W = pAdx$$

आप देखेंगे कि पिस्टन की बाहर की ओर गति के कारण तंत्र के आयतन में वृद्धि होती है। $Adx = dV$ लिखने पर



चित्र 3.5 : गैसीय तंत्र के प्रसार के दौरान किया गया कार्य। यहाँ i और f क्रमशः आदि और अंतिम अवस्थाओं को प्रकट करती हैं।

हमें यांत्रिक कार्य का यह व्यंजक प्राप्त होता है :

$$\delta W = pdV \qquad (3.1)$$

अब भाग 1.4.2 को फिर से देखिए और तृतीय अनुच्छेद को पुनः पढ़िए। इसे पढ़ने पर यह पता चलता है कि हमें यह मान लेना होगा कि तंत्र स्थैतिककल्प अवस्था में (quasi-statically) आयतन V_i से V_f तक फैलता है। दूसरे शब्दों में V_i और V_f क्रमशः प्रारंभिक और अंतिम आयतन हैं। तब अपने परिवेश पर गैसीय तंत्र द्वारा किया गया कार्य

$$\triangle W = \int_{V_i}^{V_f} pdV \qquad (3.2)$$

होता है। समीकरण (3.2) के समाकल का मान मालूम करने के लिए यह जानना आवश्यक है कि p किस प्रकार V पर निर्भर करता है। यह प्रक्रिया की प्रकृति से प्राप्त होता है।

आपको याद होगा कि आप भाग 1.4.3 में यह पढ़ चुके हैं कि किसी भी क्षण पर इस p और V को सूचक आरेख में एक बिन्दु के रूप में दिखा सकते हैं। इन बिन्दुओं को मिलाने वाली रेखा से प्रसार प्रक्रिया का पथ प्राप्त होता है। इस रेखा का ठीक-ठीक रूप V के साथ p के विचरण की प्रकृति पर निर्भर करता है। इसके लिए चित्र 3.6 देखिए। आप देखेंगे कि pdV छायादार पट्टी के क्षेत्रफल को निरूपित करता है। अतः **$\triangle W$ प्रारंभिक अवस्था से अंतिम अवस्था तक हुए सभी अत्यणु परिवर्तनों के लिए प्राप्त पट्टियों के क्षेत्रफलों का जोड़ है। अर्थात यह V और p के प्रारंभिक अवस्था और अंतिम अवस्था के मानों से परिबद्ध तंत्र के आरेख का अंतर्गत क्षेत्रफल है।**

आइए अब हम एक आदर्श गैस के समतापी प्रसार (या संपीड़न) के लिए गैसीय तंत्र द्वारा किया गया कार्य मालूम करें। आपको याद होगा कि यह तंत्र निम्नलिखित अवस्था समीकरण का पालन करता है :

$$pV = nRT$$

जहाँ प्रतीकों के जाने माने अर्थ हैं।

समीकरण (3.1) में p का मान प्रतिस्थापित करने और ताप-स्थिरता (समतापी परिवर्तन) को प्रकट करने के लिए अनुलग्न T को लगाने पर हमें यह प्राप्त होता है :

$$\delta W_T = (nRT/V)\, dV \qquad (3.3)$$

अतः समीकरण (3.2) का प्रयोग करने पर हमें यह व्यंजक प्राप्त होता है

$$\triangle W_T = nRT \ln (V_f/V_i) \qquad (3.4)$$

$$= 2.303\, nRT \log (V_f/V_i)$$

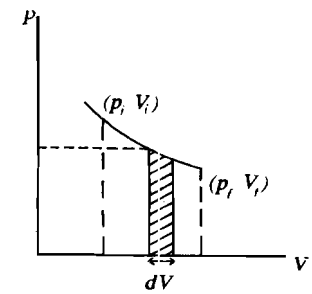
इस समीकरण को देखने से यह पता चलता है कि गैस की दी हुई मात्रा में समतापी प्रसार होता हो, तो इसके द्वारा किया गया कार्य ताप T और अंतिम आयतन तथा प्रारंभिक आयतनों के अनुपात (V_f/V_i) पर निर्भर करता है। प्रसार के दौरान $V_f > V_i$. अतः $\triangle W_T$ धनात्मक होता है और इसे चित्र 3.7 में छायादार क्षेत्र से दिखाया गया है। इसके विपरीत, जब गैस संपीड़ित होती है, अर्थात् $V_f < V_i$ हो तो $\triangle W_T$ ऋणात्मक होता है। इससे यह पता चलता है कि तंत्र पर कार्य किया गया है। इसका मान भी छायादार भाग के क्षेत्रफल से प्राप्त हो जाएगा।

अब, मान लीजिए कि गैस में सम-आयतनिक (isochoric) प्रक्रिया हुई है। इस स्थिति में $dV = 0$ जिससे कि $\delta W = pdV = 0$. अर्थात् सम-आयतनिक प्रक्रिया में कोई कार्य नहीं होता।

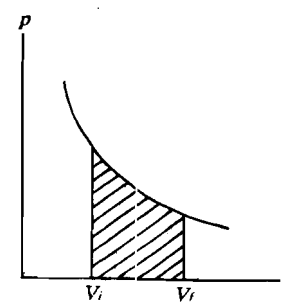
इस संकल्पना को और अच्छी तरह से समझने के लिए आइए हम एक उदाहरण हल करें।

परिपाटी

आप देखेंगे कि कार्य (W) और ऊष्मा (Q) जैसी राशियाँ अवस्था के फलन नहीं हैं जबकि आंतरिक ऊर्जा (U), अवस्था का एक फलन है। अनावस्था फलन (non-state function) राशी के मान में अत्यणु परिवर्तन को संबंधित राशि की बायीं ओर δ प्रतीक रखकर प्रकट किया जाता है। कुछ पुस्तकों में δ प्रतीक के स्थान पर d का प्रयोग किया जाता है। अवस्था फलन (state function) राशी में अत्यणु परिवर्तन को संबद्ध राशि के बायीं ओर प्रतीक d रखकर प्रकट किया जाता है। अतः अत्यणु कार्य δW होता है, या तंत्र को दी गई अत्यणु ऊष्मा δQ होती है, जबकि आंतरिक ऊर्जा में अत्यणु परिवर्तन dU है।



चित्र 3.6 : फैल रहे गैसीय तंत्र का आरेख।



चित्र 3.7 : समतापी प्रसार में आदर्श गैस द्वारा किया गया कार्य।

उदाहरण 2

मानक ताप और दाब पर दो मोल आदर्श गैस को पहले अपने मूल आयतन से तीन गुने आयतन में समतापीय रूप में प्रसारित किया गया है। और फिर इसे सम-आयतनिक रूप में तब तक संपीड़ित किया जाता है जब तक कि दाब अपना मूल मान प्राप्त नहीं कर लेता। किया गया कुल कार्य मालूम कीजिए।

हल : समतापी प्रसार में गैस द्वारा किया गया कार्य

$$\triangle W_T = nRT \ln (V_f/V_i)$$

यहाँ $V_f/V_i = 3$, अतः

$$\triangle W_T = (2 \text{ mol}) \times (8.3 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}) \times (273 \text{ K}) \ln 3$$

$= 5.0 \times 10^3$ J

सम-आयतनिक प्रक्रिया के दौरान कोई कार्य नहीं होता। अतः गैस द्वारा किया गया कुल कार्य $= 5.0 \times 10^3$ J

अब, अन्य तंत्रों में कार्य के व्यंजक प्राप्त करने से पहले आप एक बोध प्रश्न हल करना चाहेंगे।

बोध प्रश्न 3

क) दिखाइए कि समीकरण (3.4) को इस रूप में भी लिखा जा सकता है।

$$\triangle W_T = nRT \ln (p_i/p_f)$$

ख) समदाबी प्रतिवेधों के अधीन एक गैसीय तंत्र आयतन V_1 से आयतन V_2 तक फैलता है। इस प्रक्रिया के दौरान किया गया कार्य मालूम कीजिए। इसे एक सूचक आरेख पर भी दिखाइए।

3.4.2 अन्य तंत्र

मान लीजिए एक तार का एक सिरा नियत है और दूसरे सिरे पर तात्क्षणिक् तनाव का परिमाण F है। इस तनाव (tension) के कारण तार की लंबाई L से बढ़कर $L + dL$ हो जाती है। तब किया गया कार्य

$$\delta W_F = -FdL \tag{3.5}$$

होता है। ऋणात्मक चिन्ह से यह पता चलता है कि तार के विस्तार के लिए इस पर कार्य अवश्य किया गया है।

यदि स्थैतिककल्प ढंग (quasi-static manner) से तार की लंबाई में परिवर्तन L_i से L_f हो जाता हो, तो तार पर किया गया संपूर्ण कार्य

$$\triangle W_F = -\int_{L_i}^{L_f} FdL \tag{3.6}$$

समीकरण (3.1) और (3.5) के अनुरूप आइए निम्नलिखित स्थितियों के लिए कार्य के व्यंजक प्राप्त करें : (i) आवेश dq के स्थानांतर के दौरान एक वैद्युत सेल द्वारा, तथा (ii) एक चुंबकीय क्षेत्र में रखे गए अनुचुंबकीय पदार्थ पर उसके चुंबकीकरण में dM से वृद्धि करने में। स्थिति (i) के लिए हमें यह प्राप्त होता है

$$\delta W_E = -Edq \tag{3.7}$$

जहाँ E सेल का e.m.f. है। स्थिति (ii) के लिए हमें यह प्राप्त होता है

$$\delta W_M = -VB_a\, dM$$

जहाँ B_a अनुप्रयुक्त चुंबकीय क्षेत्र है और V पदार्थ का आयतन है।

आइए अब ऊपर दिए गए व्यंजकों को दो संख्यात्मक उदाहरणों से समझने की कोशिश करें।

उदाहरण 3

2.5 m लंबी और 2.5×10^{-6} m^2 अनुप्रस्थ परिच्छेद क्षेत्रफल वाले एक इस्पात तार को एक मरोड़ी शीर्ष से लटकाया गया है। मुक्त सिरे से 5 kg का एक भार लटकाने पर उसकी लंबाई बढ़ जाती है। तार पर किया गया कार्य मालूम कीजिए। इस्पात का यंग-गुणांक (Young's Modulus) 2×10^{11} Nm^{-2} है।

हल

हम जानते हैं कि तार में उत्पन्न अनुदैर्ध्य विकृति (longitudinal strain) प्रतिबल और यंग-गुणक के अनुपात के बराबर होता है :

$$\frac{dL}{L} = \frac{F/a}{Y}$$

विभिन्न मानों को प्रतिस्थापित करने पर आप देखेंगे कि

$$dL = \frac{FL}{aY} = \frac{(5 \times 9.8\,\text{N}) \times (2.5\,\text{m})}{(2.5 \times 10^{-6}\,\text{m}^2) \times (2 \times 10^{11}\,\text{Nm}^{-2})}$$

$= 2.45 \times 10^{-4}$m

$= 2.4 \times 10^{-4}$ m

अतः तनित तार द्वारा किया गया कार्य

$$\delta W = -FdL$$

$$= -(5 \times 9.8 \text{ N}) \times (2.4 \times 10^{-4} \text{ m})$$

$$= -1.1 \times 10^{-2} \text{J}$$

ऋणात्मक चिन्ह तार पर किये गए कार्य को निरूपित करता है।

dL के मान को दो सार्थक अंकों तक रखना है। यहां एक विशेष परिस्थिति है क्योंकि छोड़ा जाने वाला अंक 5 है। परंपरा से, अंक 5 से पहले आने वाली सम संख्या को ज्यों का त्यों रखा जाता है।

उदाहरण 4

तापमान के साथ एक अनुचुंबकीय पदार्थ की चुंबकीय प्रवृत्ति (magnetic susceptibility) $\chi = C/T$ के अनुसार परिगमन होता है, जहाँ C एक अचर है (कूरी-नियम)। दिखाइए कि चुंबकीकरण में M_i से M_f तक के स्थैतिककल्प समतापी परिवर्तन के दौरान अनुचुंबकीय पदार्थ पर किया गया कार्य

$$\triangle W_M = \frac{CV}{2\mu_0 T}\left(B_{af}^2 - B_{ai}^2\right) = \frac{\mu_0 TV}{2C}\left(M_f^2 - M_i^2\right)$$

होता है। 2.1 K पर $\chi = 9.0 \times 10^{-2}$ $\text{NA}^{-1}\text{m}^{-1}\text{T}^{-1}$ और आयतन $2 \times 10^{-4}\text{m}^3$ वाले तंत्र पर किए गए कार्य का मान निकालने के लिए इस परिणाम का प्रयोग कीजिए जबकि इस तापमान पर अनुप्रयुक्त अभिवाह घनत्व (flux density) को 0.7 T से 1.2 T तक वृद्धि करके इसे चुंबकीकृत किया गया हो।
($\mu_0 = 12.57 \times 10^{-7}$ NA^{-2})

संकेत T का प्रयोग केल्विन मापक्रम में तापमान के लिए किया जाता है। इसका मात्रक केल्विन (K) है। उदाहरण 4 में T, टेस्ला (tesla) को प्रकट करता है जो कि चुंबकीय प्रेरण या अभिवाह घनत्व का मात्रक है।

$\chi = \frac{M}{H}$, जहाँ M प्रति एकक आयतन चुंबकीय आघूर्ण है। चुंबकीय आघूर्ण (magnetic torque) का मात्रक निम्नलिखित के तुल्य होता है।

$$\frac{\text{बलआघूर्ण}}{\text{चुंबकीय प्रेरण}}$$

अतः यह Nm T^{-1} होता है
इसलिए M का मात्रक $\text{Nm T}^{-1}\text{ m}^{-3}$
अर्थात् $\text{Nm}^{-2}\text{ T}^{-1}$ है और H का मात्रक Am^{-1} है अतः χ का मात्रक $\frac{\text{Nm}^{-2}\text{T}^{-1}}{\text{Am}^{-1}}$
अर्थात $\text{NA}^{-1}\text{ m}^{-1}\text{ T}^{-1}$ है।

हल

अनुप्रयुक्त अभिवाह घनत्व $B_a = \mu_0 H$ में चुंबकीकरण dM विकसित करने में आयतन V अनुचुंबकीय प्रतिदर्श (sample) द्वारा किया गया कार्य

$$\delta W_M = -VB_a\, dM$$

है। यहाँ $M = \chi B_a/\mu_0 = \left(\frac{C}{T}\right)\frac{B_a}{\mu_0}$. अतः समतापी अवस्था में $dM = (C/\mu_0 T)\, dB_a$.

जब B_a, B_{ai} से परिवर्तित होकर B_{af} हो जाता है, तो प्रतिदर्श द्वारा किया गया कार्य

$$\triangle W_M = -V\int_{B_{ai}}^{B_{af}} B_a \frac{C}{\mu_0 T}\, dB_a = -\frac{CV}{2\mu_0 T}\left(B_{af}^2 - B_{ai}^2\right)$$

$$= -\frac{CV}{2\mu_0 T}\left\{\left(\frac{\mu_0 T}{C} M_f\right)^2 - \left(\frac{\mu_0 T}{C} M_i\right)^2\right\}$$

$$= -\frac{\mu_0 TV}{2C}\left(M_f^2 - M_i^2\right)$$

यदि अनुचुंबकीय पदार्थ को एक बाह्य चुंबकीय क्षेत्र में रखा जाए, तो इसकी प्रवृत्ति बाह्य क्षेत्र की दिशा में दुर्बलतः संरेखित (weakly aligned) होने की होती है। ऐसे पदार्थ की प्रवृत्ति ($\chi = \frac{M}{H}$, जहाँ H चुंबकीय क्षेत्र है और M चुंबकीकरण की तीव्रता है) का अति निम्न धनात्मक मान होता है।

ऋणात्मक चिन्ह इस बात का द्योतक है कि चुंबकीकरण के दौरान पदार्थ पर कार्य किया गया है। अतः प्रतिदर्श पर किए गए कार्य का व्यंजक

$$\triangle W_M = \frac{CV}{2\mu_0 T}\left(B_{af}^2 - B_{ai}^2\right) = \frac{\mu_0 TV}{2C}\left(M_f^2 - M_i^2\right)$$

विचुंबकीकरण ($M_i > M_f$) के दौरान पदार्थ द्वारा कार्य किया जाता है।

है अब दिए हुए मान प्रतिस्थापित करने पर आप देखेंगे कि

$$\chi = \frac{C}{T} = 9.0 \times 10^{-2}\ \text{NA}^{-1}\ \text{m}^{-1}\ \text{T}^{-1},\ V = 2 \times 10^{-4}\ \text{m}^3$$

$$B_{ai} = 0.7\ \text{T},\ B_{af} = 1.2\ \text{T}$$ और $\mu_0 = 12.57 \times 10^{-7}\ \text{NA}^{-2}$

अतः प्रतिदर्श पर किया गया कार्य

$$\frac{NA^{-1}\,m^{-1}\,T^{-1}\,m^3\,T^2}{NA^{-2}}$$

$$\Delta W_M = \frac{CV}{2\mu_0 T}\left(B_{af}^2 - B_{ai}^2\right)$$

$$= (9.0 \times 10^{-2} NA^{-1}\,m^{-1}\,T^{-1}) \times \frac{(2 \times 10^{-4}\,m^3)}{(2 \times 12.57 \times 10^{-7}\,NA^{-2})} \times$$

$$= 6.8\ J\ (1.2^2 - 0.7^2)\ T^2$$

$= A\ Tm^2$
$= A$ (weber)
$= AV\text{-}s$
$=$ (As) (V)
$=$ (coulomb) (volt)
$=$ joule

अब आप किए गए कार्य के व्यंजकों को अच्छी तरह से समझने के लिए एक बोध प्रश्न हल करना चाहेंगे।

बोध प्रश्न 4

1.40V के e.m.f. वाले लेक्वांचे सेल (Leclanche cell) द्वारा किया गया कार्य मालूम कीजिए, जो 1 मिनट तक 150mA की अचर धारा सप्लाई करता है।

निम्नलिखित सारणी में हमने विभन्न तंत्रों द्वारा किए गए कार्य के व्यंजक दिए हैं। यहाँ प्रयुक्त प्रतीकों के सामान्य अर्थ हैं।

सारणी 3.1 : विभिन्न तंत्रों द्वारा कार्य के व्यंजक

तंत्र	अत्यणु कार्य (δW)	प्रक्रिया के दौरान किया गया कार्य
गैसीय	pdV	V_i से V_f तक आयतन में प्रसार, $\Delta W_T = \int_{V_i}^{V_f} pdV$
अनुचुंबकीय पदार्थ	$-VB_a dM$	M_i से M_f तक चुंबकीकरण में वृद्धि, $\Delta W_M = -V \int_{M_i}^{M_f} B_a\, dM$
पृष्ठ फिल्म	$-s dA$	A_i से A_f तक पृष्ठ क्षेत्रफल में वृद्धि, $\Delta W_s = -\int_{A_i}^{A_f} s\, dA$
तनित तार	$-FdL$	L_i से L_f तक तार की लंबाई में वृद्धि, $\Delta W_F = \int_{L_i}^{L_f} F dL$
विद्युत सेल	$-Edq$	t_i से t_f के समय-अंतराल में विद्युत सेल से होकर जाने वाली धारा i के कारण कार्य, $\Delta W_E = -\int_{t_i}^{t_f} E\, i\, dt$

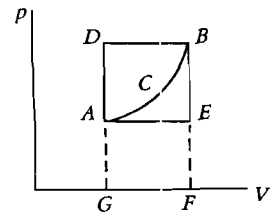
अब आप ऊष्मागतिक प्रक्रियाओं में किये गये कार्यों का मान मालूम कर सकते हैं। आइए अब जाने कि कार्य और ऊष्मा किसी प्रक्रिया के पथ पर निर्भर करती है कि नही।

3.5 कार्य और ऊष्मा की पथ-निर्भरता

भाग 3.4.1 में आपने देखा कि गैसीय तंत्र द्वारा किए गए कार्य को प्रारंभिक अवस्था से अंतिम अवस्था तक तंत्र के p-V आरेख के अंतर्गत क्षेत्रफल द्वारा निरूपित किया जा सकता है। अब आप चित्र 3.8 देखिए। प्रक्रिया ACB के दौरान किया गया कार्य क्षेत्रफल $ACBFG$ के बराबर है और प्रक्रियाओं ADB और AEB के दौरान किए कार्य क्रमशः क्षेत्रफल $DBFG$ और $AEFG$ हैं। ये क्षेत्रफल बराबर नहीं हैं। अतः हम कह सकते हैं कि इन प्रक्रियाओं के दौरान किया गया कार्य समान नहीं होगा। इस तरह हम यह पाते हैं कि किया गया कार्य अनुसरण किए गए पथ पर निर्भर करता है अर्थात् किया गया कार्य प्रक्रिया के केवल प्रारंभिक और अंतिम अवस्था चरों पर ही निर्भर नहीं करता। दूसरे शब्दों में, कार्य अवस्था का फलन नहीं होता। अब प्रश्न उठता है कि क्या यह बात ऊष्मा पर भी लागू होती है? इसे समझने के लिए आइए हम एक सरल उदाहरण लें।

मान लीजिए कि एक गिलास में दूध 30°C पर है और हम इसके तापमान में 5°C की वृद्धि करना चाहते हैं। **ऐसा उसे और अधिक गर्म करके, तेजी से मंथन (churning), या तापन और मंथन दोनों ही द्वारा किया जा सकता है।** फिर भी, इन सभी स्थितियों में अंततः हम उस अवस्था को प्राप्त कर लेते हैं जब हम कह सकते हैं कि दूध का तापमान 35°C हो गया है। इन सभी स्थितियों में दूध का 30°C पर होना, प्रारंभिक अवस्था माना जा सकता है। इन अवस्थाओं को जोड़ने वाली प्रक्रियाएँ अलग-अलग हैं और इन तीन प्रक्रियाओं में तंत्र को दी गई ऊष्मा की मात्राएँ भी अलग-अलग हैं। अतः हम यह कह सकते हैं कि तंत्र को दी गई ऊष्मा, प्रक्रिया अनुरूपित पथ पर निर्भर करती है। अतः यह तंत्र की अवस्था का फलन नहीं है।

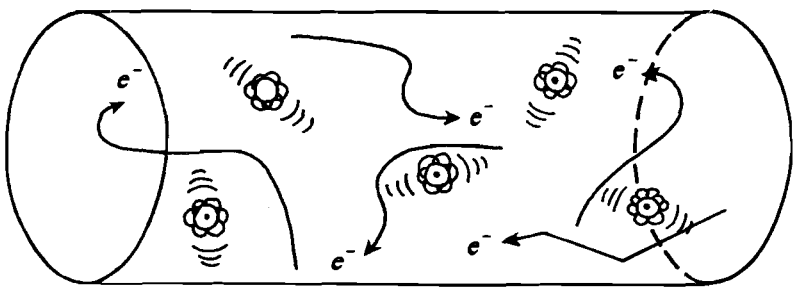
इस बात की ओर आपने अवश्य ध्यान दिया होगा कि पिछले उदाहरण में सभी स्थितियों में तंत्र पर किया गया कार्य भी समान नहीं है। यह कोई अप्रत्याशित बात नहीं है, क्योंकि हम यह देख चुके हैं कि कार्य, अवस्था का फलन नहीं होता। अब प्रश्न उठता है कि क्या कोई ऐसा फलन हो सकता है, जिसके मान में इन प्रक्रियाओं के दौरान समान परिवर्तन होता हो जिससे कि यह इन अवस्थाओं को जोड़ने वाले पथ से स्वतंत्र रहे? उत्तर है "हां", अर्थात् ऐसे फलन का अस्तित्व है। इसे आंतरिक ऊर्जा (internal energy) कहते हैं। आइए, अब हम इस पर विस्तार से चर्चा करें।



चित्र 3.8 : बिन्दुओं A और B को अनेक पथों से जोड़ा गया है। पथ ACB एक व्यापक प्रक्रिया को प्रकट करता है। पथ ADB समदाबी और सम-आयतनिक प्रक्रिया का एक संयोजन है जबकि पथ AEB सम-आयतनिक और समदाबी प्रक्रिया का संयोजन है।

3.6 आंतरिक ऊर्जा

तंत्र की आंतरिक ऊर्जा, इसकी अलग-अलग घटकों (components) की ऊर्जाओं का योग होती है। इसमें यादृच्छिक गति (random motion) से उत्पन्न गतिज ऊर्जा (kinetic energy) और घटकों की परस्पर क्रिया (interaction) के कारण उनकी स्थितिज ऊर्जा (potential energy) भी शामिल है। उदाहरण के लिए, एक धातु छड़ की आंतरिक ऊर्जा चालन इलेक्ट्रॉनों (conduction electrons) की गतिज ऊर्जा, धातु के परमाणुओं की स्थितिज ऊर्जा और उनकी साम्य स्थितियों के प्रति उनकी कम्पन ऊर्जा (vibrational energy) का योग होती हैं (चित्र 3.9)।



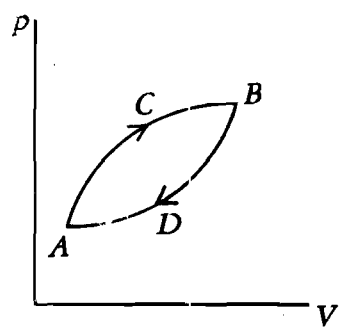
चित्र 3.9 : धातु-छड़ की आंतरिक ऊर्जा में चालन इलेक्ट्रॉनों (e^-) की गतिज ऊर्जा और धातु के परमाणुओं की कंपन ऊर्जा शामिल हैं।

आंतरिक ऊर्जा एक अवस्था फलन (state function) है। यह **केवल** तापमान, दाब और आयतन जैसे अवस्था चरों पर ही निर्भर करती है। आप यह भी मान सकते हैं कि गैसीय तंत्र में किया गया कार्य इन चरों पर भी निर्भर करता है। पर, आप जानते हैं कि किया गया कार्य एक अवस्था-फलन नहीं है। इसे समझने के लिए आप इस अनुच्छेद के दूसरे वाक्य को फिर से ध्यानपूर्वक पढ़िए। इसमें हमने "केवल" शब्द पर विशेष बल दिया है। किया गया कार्य अनुसरण किए गए पथ पर भी निर्भर करता है। इस संकल्पना को और अच्छी तरह से समझने के लिए भाग 3.4 में दिए गए उदाहरण को फिर से पढ़ें। दूध के तापमान में 5°C की वृद्धि कर देने से दूध में अणुओं की गति और तेज हो जाती है। दूसरे शब्दों में हम यह कह सकते हैं कि इसकी आंतरिक ऊर्जा बढ़ गई है। क्योंकि प्रत्येक स्थिति में तापमान में समान मात्रा में वृद्धि होती है, इसलिए आंतरिक ऊर्जा में हुए परिवर्तन भी समान होते हैं। अतः दूध के तापमान में 5°C की वृद्धि करने के लिए चाहे कुछ भी ऊष्मा दी गई हो और कुछ भी कार्य किया गया हो, हर स्थिति में आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन सदा समान रहता है। इससे यह पता चलता है कि आंतरिक ऊर्जा तंत्र की अवस्था का एक फलन है। अब आप इस संकल्पना पर आधारित एक बोध प्रश्न हल करें।

बोध प्रश्न 5

क) आप जानते हैं कि आदर्श गैस के अणुओं के बीच कोई अंतराअणुक (intermolecular) बल नहीं होता। इस संकल्पना की सहायता से सिद्ध कीजिए कि आदर्श गैस की आंतरिक ऊर्जा केवल तापमान पर निर्भर करती है।

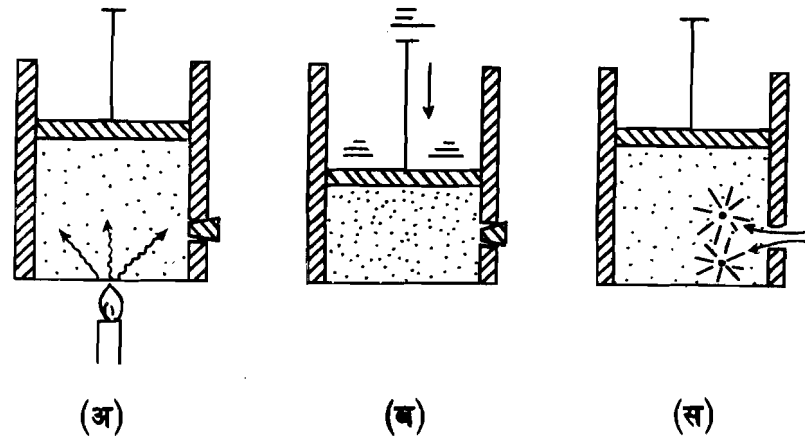
ख) चक्रीय प्रक्रिया (cyclic process) के दौरान आंतरिक ऊर्जा में कोई परिवर्तन नहीं होता (चित्र 3.10)। इस कथन की विवेचना कीजिए।



चित्र 3.10 : चक्रीय प्रक्रिया।

अभी तक हमने यह देखा है कि तंत्र में ऊष्मा और कार्य निवेश (work-input) से उसकी आंतरिक ऊर्जा में वृद्धि होती है। इसी प्रकार, यदि तंत्र से ऊष्मा निकाल ली जाए या तंत्र द्वारा कुछ कार्य संपन्न कराया जाए तो उसकी आंतरिक ऊर्जा कम हो जाती है। चित्र 3.11 में हमने व्यवस्थित रूप में अलग-अलग विधियों को दिखाया है जिनसे तंत्र की आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन किया जा सकता है। चित्र 3.11 (क) और (ख) से संबंधित कुछ उदाहरणों पर तो हमने

चर्चा की है। चित्र 3.11 (ग) वाली स्थिति को विसरण अन्योन्यक्रिया (diffusive interaction) कहा जाता है। क्योंकि इस खंड में हम जिन तंत्रों पर चर्चा करेंगे उनमें विसरण अन्योन्यक्रिया का कोई विशेष महत्व नहीं है, इसलिए यहां हम इस पर चर्चा नहीं करेंगे।



चित्र 3.11 : तीन प्रकार की प्रक्रियाएँ जिनसे तंत्र की आंतरिक ऊर्जा परिवर्तित की जा सकती है। (क) ऊष्मा-ऊर्जा निविष्ट करके, (ख) इस पर कार्य करके, और (ग) इसमें कुछ मिलाकर।

अब हम आंतरिक ऊर्जा के परिवर्तन का विश्लेषण करने के लिए सुपरिचित ऊर्जा संरक्षण-नियम (principle of conservation of energy) लागू करेंगे और इस प्रक्रिया के दौरान हम ऊष्मागतिकी का प्रथम नियम प्राप्त करेंगे।

3.7 ऊष्मागतिकी का प्रथम नियम

ऊर्जा संरक्षण नियम के अनुसार ऊर्जा न तो पैदा की जा सकती है और न ही नष्ट की जा सकती है ; इसे एक रूप से दूसरे रूप में रूपान्तरित किया जा सकता है तथा (इस विश्व में) संपूर्ण ऊर्जा सदा नियत बनी रहती है। इस नियम के अनुसार **यदि किसी तंत्र की ऊर्जा में वृद्धि होती है, तो इतनी ही ऊर्जा कहीं न कहीं अवश्य खर्च हुई होगी।**

आइए अब हम दूध का तापमान बढ़ाने वाले उदाहरण पर फिर से विचार करें। यहां आप यह कह सकते हैं कि दूध की आंतरिक ऊर्जा में वृद्धि तीन विधियों से की जा सकती है (i) केवल ऊष्मा-निवेश के जरिए (ii) केवल कार्य निवेश के जरिए, और (iii) ऊष्मा और कार्य निवेश के संयोजन के जरिए।

प्रथम अवस्था में यदि तंत्र द्वारा अवशोषित (absorbed) ऊष्मा $\triangle Q'$ है और तंत्र पर किया गया कार्य शून्य है, तो तंत्र द्वारा किया गया कार्य भी शून्य होगा। इसी प्रकार द्वितीय अवस्था में अवशोषित ऊष्मा शून्य है और तंत्र द्वारा किया गया कार्य $\triangle W'$ है, तो तंत्र पर किया गया कार्य $-\triangle W'$ होगा। तथा (iii) के लिए मान लीजिए अवशोषित ऊष्मा $\triangle Q$ है और तंत्र द्वारा किया गया कार्य $\triangle W$ है तो तंत्र पर किया गया कार्य $-\triangle W$ होगा।

हम जानते हैं कि सभी स्थितियों में आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन समान रहता है। मान लीजिए यह परिवर्तन $\triangle U$ है। (यहाँ सभी राशियों को ऊष्मा मात्रक में व्यक्त किया गया है।) ऊर्जा संरक्षण नियम के अनुसार, आतंरिक ऊर्जा में

वृद्धि = (अवशोषित ऊष्मा) + (तंत्र पर किया गया कार्य)

अर्थात् $\triangle U = \triangle Q' - \triangle W' = \triangle Q + (-\triangle W)$

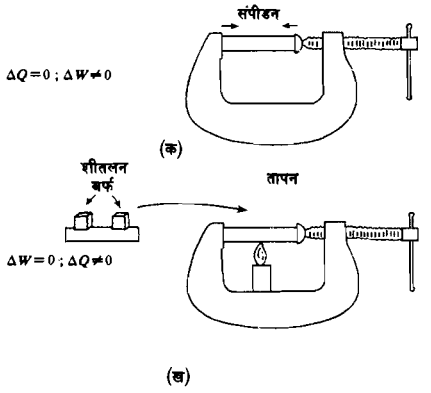
या $\triangle U = \triangle Q - \triangle W$ (3.9)

समीकरण (3.9) को ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम का गणितीय रूप माना जा सकता है। इसमें विसरण-अन्योन्यक्रिया की उपेक्षा कर दी गई है। यानि यदि इस अन्योन्यक्रिया के बारे में कुछ न कहा गया हो, तो हम यह मान लेते हैं कि यह अन्योन्यक्रिया उपस्थित नहीं है। प्रथम नियम का औपचारिक कथन यह है :

किसी तंत्र की आंतरिक ऊर्जा अवस्था का एक फलन है और ऊष्मागतिक प्रक्रिया के दौरान इसमें होने वाला परिवर्तन तंत्र को दी गई ऊष्मा और तंत्र पर किए गए कार्य के जोड़ के बराबर होता है। इस तरह, इस नियम के अनुसार हम यह कह सकते हैं कि दो विशेष अवस्थाओं के बीच हो रही ऊष्मागतिक प्रक्रियाओं के लिए तंत्र द्वारा अवशोषित ऊष्मा और तंत्र द्वारा किए गए कार्य का अंतर सदा ही अचर रहता है और तंत्र की आंतरिक ऊर्जा में हुए परिवर्तन के बराबर होता है।

अब चित्र 3.12 को देखिए और ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम को भली-भांति समझने के लिए उस पर दिए गए कैप्शन (caption) को सावधानी से पढ़िए :

जब कभी ऊष्मा-ऊर्जा को किसी अन्य रूप में (जैसे भाप इंजन या बिजली के हीटर में) रूपांतरित किया जाता है, तो प्रत्येक रूप में यह तुल्य रहती है। यदि ऊष्मा-मात्रा Q को कार्य W में पूर्णतः रूपांतरित किया गया हो, तो W, Q के तुल्य होता है और $\frac{W}{Q}$ = एक अचर है, जिसे **ऊष्मा का यांत्रिक तुल्यांक** (mechanical equivalent of heat) कहा जाता है। इसे J से प्रकट किया जाता है और इसका मान लगभग 4.2 joule cal^{-1} के बराबर होता है। इस तरह, 1 calorie ऊष्मा को 4.2 J से व्यक्त कर सकते हैं। तब हम कहते हैं कि कार्य मात्रक में व्यक्त 1 calorie ऊष्मा 4.2 J है। इसी प्रकार कार्य की मात्रा को ऊष्मा मात्रकों में व्यक्त किया जा सकता है। हम अपने खंडों में विशेष समस्या पर चर्चा करने के दौरान कार्य और ऊष्मा को समान मात्रकों में व्यक्त करेंगे अर्थात् दोनों को या तो कार्य मात्रकों में या दोनों को ऊष्मा मात्रकों में व्यक्त करेंगे।



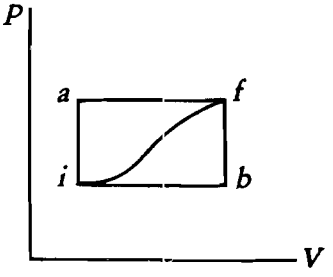
चित्र 3.12 : एक ही प्रारंभिक अवस्था से एक ही अंतिम अवस्था पर जाने के लिए दो बिल्कुल अलग-अलग पथों का चित्र। (क) लोहे की छड़ को क्लैम्प (clamp) में रखकर दबा दिया गया है। इस प्रक्रिया में लोहे की छड़ पर कार्य किया गया है, पर कोई ऊष्मा-ऊर्जा न तो दी गई है और न ही हटाई गई है ($\triangle W \neq 0;\ \triangle Q = 0$)। (ख) लोहे की छड़ को पहले ठंडा किया जा सकता है जिससे कि वह सिकुड़ जाए और क्लैम्प में चला जाए जिसे कि पहले से ही अपेक्षित अंतिम लंबाई के लिए समायोजित किया गया है। तब तापमान को अपेक्षित अंतिम तापमान प्राप्त करने के लिए इसे गर्म किया जा सकता है। ऐसा करने पर छड़ फैल जाती है और क्लैम्प में बिल्कुल चिपक जाती है। इस प्रक्रिया में छड़ पर कोई कार्य नहीं होता, पर कुछ नेट ऊष्मा स्थानांतरण होता है ($\triangle W = 0;\ \triangle Q \neq 0$)। दोनों ही प्रक्रियाओं पर छड़ समान अंतिम तापमान और दाब पर आ जाता है।

आइए अब हम ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम को अच्छी तरह से समझने के लिए दो संख्यात्मक उदाहरण लें।

पहले उदाहरण में आपको इस संकल्पना का इस्तेमाल करना होगा कि दो अवस्थाओं के बीच आंतरिक ऊर्जा में होने वाला परिवर्तन, अवस्थाओं को जोड़ने वाले पथ से स्वतंत्र होता है।

उदाहरण 5

चित्र 3.13 देखिए। जब तंत्र को पथ *iaf* के अनुदिश अवस्था *i* से अवस्था *f* तक ले जाया जाता है तो $\triangle Q = 45\ cal$ और $\triangle W = 20\ cal$ प्राप्त होता है। और पथ *ibf* के अनुदिश $\triangle Q = 30\ cal$ प्राप्त होता है।



चित्र 3.13

क) पथ *ibf* के अनुदिश $\triangle W$ क्या होगा?

ख) यदि वापसी वक्र पथ *fi* के लिए $\triangle W = -13\ cal$ है तो इस पथ के लिए $\triangle Q$ क्या होगा?

ग) यदि $U_i = 10$ cal है तो U_f क्या होगा?

घ) यदि $U_b = 21$ cal है तो *ib* और *if* प्रक्रियाओं के लिए $\triangle Q$ क्या होंगे?

हल

क) हम जानते हैं कि $U_f - U_i =$ एक अचर, जो *i* और *f* को मिलाने वाले पथ से स्वतंत्र होता है। *iaf* के लिए, $\triangle Q = 45$ cal, तथा $\triangle W = 20$ cal हैं। अतः समीकरण (3.9) से हमें यह प्राप्त होता है :

$$\triangle U = (45 - 20)\ \text{cal} = 25\ \text{cal}$$

$$\therefore\ U_f - U_i = 25\ \text{cal}$$

अतः *ibf* के लिए हमें यह प्राप्त होता है

$$25\ \text{cal} = 30\ \text{cal} - \triangle W \text{ या } \triangle W = 5\ \text{cal}$$

ख) $U_f - U_i = 25$ cal $\quad\therefore\ U_i - U_f = -25$ cal

इसलिए, वापसी पथ *fi* के लिए हमें यह प्राप्त होता है

$$-25\ \text{cal} = \triangle Q - \triangle W = \triangle Q + 13\ \text{cal}$$

$$\therefore\ \triangle Q = -38\ \text{cal}$$

ग) $U_f - U_i = 25$ cal $\quad\therefore\ U_f - 10\ \text{cal} = 25\ \text{cal}$ या $U_f = 35$ cal

घ) भाग (क) में हमने यह देखा है कि *ibf* के लिए $\triangle W = 5$ cal है पर, क्योंकि *bf* एक सम-आयतनिक प्रक्रिया है, इसलिए *bf* के लिए $\triangle W = 0$ होगा। अतः *ib* के लिए $\triangle W = 5$ cal. तथा *ib* के लिए हम यह लिख सकते हैं कि

$$U_b - U_i = \triangle Q - 5\ \text{cal}$$

या

$$21 \text{ cal} - 10 \text{ cal} = \triangle Q - 5 \text{ cal}$$

$\therefore$ *ib* के लिए $\triangle Q = 16$ cal

और, *bf* के लिए, $\triangle W = 0$ cal तथा

$$U_f - U_b = \triangle Q - 0 \text{ cal}$$

$\therefore$ 35 cal − 21 cal = $\triangle$Q

अतः *bf* के लिए, $\triangle Q = 14$ cal

अपने विद्यालय के विज्ञान पाठ्यक्रम में आप पढ़ चुके हैं कि मानक वायुमंडलीय दाब पर, जो $1.013 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$ है, 100°C पर 1g पानी को 100°C के तापमान पर 1g भाप में रूपांतरित करने के लिए 540 cal ऊष्मा की आवश्यकता होती है। इस 540 cal ऊष्मा को गुप्त ऊष्मा (latent heat) कहा जाता है, क्योंकि इस ऊष्मा के कारण तापमान में वृद्धि नहीं होती। अब प्रश्न उठता है कि इस अवशोषित ऊष्मा का क्या होता है? इसके एक भाग का उपयोग तो तंत्र द्वारा बाह्य कार्य करने में होता है और शेष भाग का उपयोग अंतरा-अणुक बंधों (intermolecular bonds) को तोड़ने में होता है जिससे कि पानी, द्रव रूप से भाप में रूपांतरित हो जाता है। दूसरे शब्दों में हम यह कह सकते हैं कि शेष भाग का उपयोग तंत्र की आंतरिक ऊर्जा में वृद्धि करने में होता है। आइए अब हम परिणाम दृष्टि से इस समस्या पर विचार करें।

उदाहरण 6

मानक वायुमंडलीय दाब (अर्थात् $1.013 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$) पर 1g पानी और 1g भाप के आयतन क्रमशः 1 c.c. और 1671 c.c. हैं। 100°C पर 1g वाष्पन प्रक्रिया के लिए $\triangle W$ और $\triangle U$ मालूम कीजिए। (भाप की गुप्त ऊष्मा = 540 cal g^{-1})

हल

समीकरण (3.9) से हम यह जानते हैं कि

$$\triangle U = \triangle Q - \triangle W$$

यह दिया हुआ है कि $\triangle Q = 540$ cal तथा $\triangle W = p\,(V_2 - V_1)$ है, जहाँ V_1 और V_2. क्रमशः पानी और भाप के विशिष्ट आयतन हैं।

यहाँ $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$, $V_2 = 1671$ c.c., तथा $V_l = 1$ c.c.

$$\therefore \triangle W = (1.013 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}) \times (1670 \text{ cm}^3)$$
$$= (1.013 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}) \times (1670 \times 10^{-6} \text{ m}^3)$$
$$= \frac{1.013 \times 167 \text{ J}}{4.2 \text{ J cal}^{-1}} = 40.3 \text{ cal}$$

तथा $\triangle U = (540 - 40.3) \text{ cal} = 499.7 \text{ cal}$

इस तरह हम यह पाते हैं कि 540 cal में से केवल 40.3 cal ऊष्मा ही बाह्य कार्य करने में खर्च होती है और शेष ऊष्मा तंत्र की आंतरिक ऊर्जा में वृद्धि करने में खर्च होती है। इस प्रक्रिया के लिए $\triangle U$ (= 499.7 cal) को प्रायः "आंतरिक गुप्त ऊष्मा" (internal latent heat) कहा जाता है।

अब आप एक बोध प्रश्न हल करना चाहेंगे।

बोध प्रश्न 6

एक व्यक्ति प्रतिदिन 10^4J आहार लेता है और प्रतिदिन कुल 1.2×10^4J ऊर्जा खर्च करता है। प्रतिदिन आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन मालूम कीजिए। यदि खर्च हुई ऊर्जा $1.6 \times 10^4 \text{J kg}^{-1}$ की दर से सुक्रोज (sucrose) से प्राप्त होता हो तो बताइए कि कितने दिनों में उसके द्रव्यमान में 1 kg की कमी जाएगी।

हम ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम के और अनुप्रयोगों के बारे में अध्ययन इकाई 4 में करेंगे। पर, इसके लिए हमें इस नियम के अवकल (differential) रूप को जानना आवश्यक होता है। अब हम इसी पर चर्चा करेंगे।

3.7.1 प्रथम नियम का अवकल रूप

आप पढ़ चुके हैं कि कार्य और ऊष्मा जैसे फलनों के परिवर्तन पथ पर निर्भर करते हैं, पर आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन पथ पर निर्भर नहीं करता। इन परिणामों के गणितीय रूपों की आवश्यकता हमें प्रथम नियम को अवकल रूप में व्यक्त करने के लिए पड़ती है। आइए अब हम इसका अध्ययन करें।

भाग 1.6.1 में आप पढ़ चुके हैं कि यदि z दो चरों x और y का फलन है, यानि

$$z = z(x, y),$$

तो

$$dz = z(x + dx, y + dy) - z(x, y)$$
$$= Mdx + Ndy$$

यहां $M = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y$ और $N = \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x$ x और y के फलन हैं।

यहाँ अत्यणु राशि dz को अन्य प्रकार की अत्यणु राशियों से भेद रखने के लिए "यथातथ अवकल" (exact differential) कहा जाता है। उदाहरण के लिए, मान लीजिए कि

$$dz = xdy + ydx$$

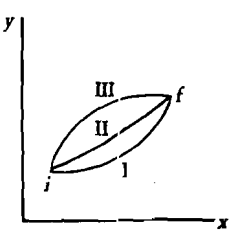
यह एक यथातथ अवकल है, क्योंकि

$$z = z(x, y) = xy \tag{3.10}$$

यदि कोई प्रारंभिक बिन्दु i से, जो (x_i, y_i) है, अंतिम बिन्दु f तक, जो (x_f, y_f) है, जाता है तो z में संगत परिवर्तन

$$z_f - z_i = \int_i^f dz = \int_i^f (Mdx + Ndy)$$

होता है। क्योंकि $z_f - z_i$ केवल प्रारंभिक बिन्दु और अंतिम बिन्दु पर निर्भर करता है, इसलिए समाकल (integral) भी इन्हीं बिन्दुओं पर निर्भर करेगा। यह i और f को मिलाने वाले पथ से, जिसके अनुदिश इसका मान मालूम किया जाता है, स्वतंत्र होता है (चित्र 3.14).



चित्र 3.14 : पथ I, II और III के लिए $(z_f - z_i) = \int_i^f (Mdx + Ndy)$ का मान समान होता है

ध्यान रहे कि प्रत्येक अत्यणु राशि यथातथ अवकल नहीं होती। उदाहरण के लिए मान लीजिए

$$M'(x, y)\,dx + N'(x, y)\,dy = du \tag{3.11}$$

अत्यणु राशि है, जहाँ M' और N', चर x और y के फलन हैं और du वाम पक्ष को संक्षिप्त रूप में निरूपित करता है। सामान्यतः यह सही नहीं है कि समीकरण (3.10) में मौजूद फलन $z = z(x, y)$ की तरह $u(x, y)$ भी (x, y) के फलन के रूप में इस प्रकार प्राप्त हो कि $[u(x + dx, y + dy) - u(x, y)]$ समीकरण (3.11) के वाम पक्ष के बराबर हो। इसलिए प्रायः यह भी सही नहीं होता कि समाकल $\int_i^f (M'dx + N'dy)$ i और f को जोड़ने वाले पथ से स्वतंत्र होगा। इस तरह हम यह पाते हैं कि सभी अत्यणु राशियां यथातथ अवकल नहीं होती। जब अत्यणु राशि यथातथ अवकल नहीं होती तो इसे अयथार्थ अवकल (inexact differential) कहते हैं। उदाहरण के लिए, अत्यणु राशि $(y^2\,dx + xdy)$ अयथार्थ अवकल है। क्योंकि U में परिवर्तन पथ स्वतंत्र होता है, इसलिए हम कह सकते हैं कि U में अत्यणु परिवर्तन एक यथातथ अवकल होता है जबकि W या Q में अत्यणु परिवर्तन अयथार्थ अवकल होता है। इस तरह, हम यह पाते हैं कि δW, δQ अयथार्थ हैं और dU यथातथ है। खंड 2 में U की तरह के और फलन तथा यथातथ अवकलों से आपका परिचय होगा।

इन संकल्पनाओं की सहायता से हम समीकरण (3.9) से ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम का अभीष्ट अवकल रूप प्राप्त कर सकते हैं। समीकरण (3.9) को अवकल रूप में स्थानांतरित करने पर हमें यह प्राप्त होता है :

$$dU = \delta Q - \delta W$$

या

$$\delta Q = dU + \delta W \tag{3.12}$$

समीकरण (3.12) को **प्रथम नियम का अवकल रूप** कहा जाता है। आइए अब इससे संबंधित उदाहरण लें।

उदाहरण 7

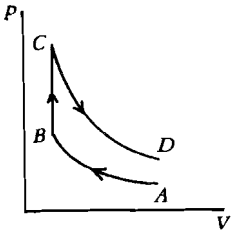
क) इस पाठ में प्रयुक्त प्रतीकों को प्रयोग करके निम्नलिखित तंत्रों के लिए ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम का अवकल

रूप लिखिए :

i) पिस्टन लगे सिलिंडर में भरी गैस

ii) तनित तार

ख) एक आदर्श गैस प्रतिदर्श में परिवर्तन स्थैतिककल्प है, जिसे p-V आरेख (चित्र 3.15) में दिखाया गया है और जिसकी व्याख्या नीचे दी गई है।



चित्र 3.15

i) AB के अनुदिश : समतापी

ii) BC के अनुदिश : सम-आयतनिक

iii) CD के अनुदिश : रुद्धोष्म

मान लीजिए dV, dp, dT और dU क्रमशः आयतन, दाब, तापमान और आंतरिक ऊर्जा में होने वाले परिवर्तन के द्योतक हैं। यदि δW और δQ क्रमशः तंत्र द्वारा किए गए कार्य और तंत्र को दी गई ऊष्मा हैं तो सारणी (3.2) में खाली स्थान पर उपयुक्त राशि भरकर इस सारणी को पूरा कीजिए। इसमें अपरिवर्तन के लिए 0, परिवर्तन में कमी के लिए "–", और परिवर्तन में वृद्धि के लिए "+" लिखिए।

सारणी 3.2

पथ	dV	dp	dT	δW	δQ	dU
AB						
BC						
CD						

हल

क) i) $\delta Q = dU + pdV$

ii) $\delta Q = dU + Fdl$

ख) i) पथ AB: इस पथ के लिए अनुदिश गैस समतापी रूप में संपीड़ित होती है जिसके लिए $dT=0$ होता है। और क्योंकि आदर्श गैस के लिए U केवल T का एक फलन होता है, इसलिए dU भी 0 होता है, dp "+" होता है और dV तथा δW "–" होते हैं, स्पष्ट है कि δQ $(= \delta W)$ भी "–" है।

ii) पथ BC: इस पथ के अनुदिश समान आयतन पर दाब में वृद्धि होती है जिससे कि $dV = 0$ और dp "+" है। और, $\delta W = pdV = 0$। अब क्योंकि केवल गैस को गर्म करके ही सम-आयतनिक रूप में दाब में वृद्धि की जा सकती है जिससे कि δQ "+" होगा। इससे dT + हो जाता है और dU $(= \delta Q - \delta W)$ भी + हो जाता है।

iii) पथ CD: क्योंकि यह गैस के रुद्धोष्म प्रसार का पथ है, इसलिए dV "+" है, dp "–" है और δW "+" है जबकि $\delta Q = 0$। तंत्र को दी गई ऊष्मा शून्य है और तंत्र द्वारा कार्य किया गया है। अतः ऊर्जा तंत्र-परिसीमा से बाहर प्रवाहित हो जाती। इसकी वजह से गैस ठंडी हो जाती है जिससे कि dT "–" होता है। dU भी "–" होता है।

अतः खाली स्थान भरने के बाद पूरी की गई सारणी यह होगी :

पथ	dV	dp	dT	δW	δQ	dU
AB	–	+	0	–	–	0
BC	0	+	+	0	+	+
CD	+	–	–	+	0	–

अब आप ऊपर बताई गई संकल्पना पर आधारित एक बोध प्रश्न हल करें। देखने में यह बोध प्रश्न लंबा लग सकता है पर इसकी लंबाई देखकर परेशान मत होइए। यह काफी सरल है।

बोध प्रश्न 7

क) एक ऊष्मारोधित तंत्र के लिए ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम का गणितीय रूप लिखिए और उसकी आंतरिक ऊर्जा में हुई परिवर्तन पर टिप्पणी दीजिए।

ख) पाठ में प्रयुक्त प्रतीकों का प्रयोग करके निम्नलिखित तंत्रों के लिए ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम का गणितीय रूप लिखिए। (i) चुंबकीय अभिवाह घनत्व B_a के प्रभाव में रखा एक अनुचुंबकीय पदार्थ (ii) एक विद्युत सेल, और (i.i) समतापी प्रतिबंधों के अधीन निर्वात में फैल रही एक आदर्श गैस।

ग) निम्नलिखित वाक्य में खाली स्थान भरिए।

एक प्रक्रिया ..... होती है, यदि $\delta Q = dU$, ... होती है यदि $dU = -\delta W$, और ..... होती है, यदि $\delta Q = \delta W$।

घ) पानी से भरे एक ट्रे को आप फ्रीजर (Freezer) में रखते हैं। ट्रे की वस्तुओं के लिए δW, δQ और dU के चिन्ह क्या होंगे? अपने उत्तर की पुष्टि कीजिए।

इस इकाई को समाप्त करने से पहले आइए हम प्रथम नियम की सार्थकताओं के बारे में थोड़ी चर्चा कर लें।

प्रथम नियम कोई नया नियम नहीं है। यह ऊर्जा संरक्षण नियम का ही एक विस्तार है। यदि कोई मशीन ऐसी होती कि वह ऊर्जा लिए बिना ही काम करती रहती तो इस स्थिति में वह शास्वत रूप से चलती रहती। यह मशीन कार्य करना शुरू करे, इसके लिए सिर्फ उसे प्रारंभ (start) करने की आवश्यकता होती है। ऐसी मशीन को **प्रथम प्रकार की शास्वत गति मशीन** (perpetual motion machine of the first kind) कहा जाता है। प्रथम नियम के अनुसार ऐसी मशीन का अस्तित्व नहीं हो सकता। यह बात कि इस प्रकार की मशीन का बनाना संभव नहीं, प्रथम नियम का एक प्रायोगिक आधार है। प्रथम नियम के द्वारा एक फलन, यानि आंतरिक ऊर्जा, परिभाषित होता है। इससे यह पता चलता है कि ऊष्मा और कार्य के दो अयथार्थ अवकलों का अंतर एक यथातथ अवकल, अर्थात् आंतरिक ऊर्जा, के बराबर होता है।

इस इकाई में हमने आपको प्रथम नियम से परिचित कराया है और कुछ उदाहरणों पर चर्चा की है। आप अगली इकाई में इस नियम के अनेक अनुप्रयोगों के बारे में अध्ययन करेंगे।

3.8 सारांश

- ऊष्मा, ऊर्जा का एक रूप है जो तापांतर के कारण तंत्रों के बीच या तंत्र और उसके परिवेश के बीच स्थानांतरित होती है।
- तंत्र को दी गई ऊष्मा को धनात्मक और तंत्र से ली गई ऊष्मा को ऋणात्मक माना जाता है।
- यदि तापांतर के बिना तंत्र और उसके परिवेश के बीच ऊर्जा की अन्योन्यक्रिया होती हो तो इसे कार्य कहा जाता है।
- ऊष्मागतिक तंत्र द्वारा किए गए कार्य को धनात्मक और तंत्र पर किए गए कार्य को ऋणात्मक माना जाता है।
- विभिन्न तंत्रों में, जिनमें परिमित परिवर्तन हुआ है, किए गए कार्य के व्यंजक ये हैं :

  गैसीय तंत्र का प्रसार : $\Delta W_T = \int_{V_i}^{V_f} p dV$

  आदर्श गैस का समतापी प्रसार : $\Delta W_T = nRT \ln (V_f/V_i)$

  तनित तार $\Delta W_f = -\int_{L_i}^{L_f} F dL$

  अभिवाह घनत्व B_a के प्रभाव में रखा हुआ एक अनुचुंबकीय पदार्थ

  $$\Delta W_M = -V \int_{M_i}^{M_f} B_a dM$$

  अचर विद्युत वाहक बल (emf) E पर धारा i की सप्लाई कर रहा एक विद्युत सेल :

  $$\Delta W_E = -\int_{t_i}^{t_f} E\, i\, dt$$

- प्रक्रिया के दौरान तंत्र द्वारा या तंत्र पर किया गया कार्य या प्रक्रिया के दौरान तंत्र द्वारा अवशोषित या उत्सर्जित ऊष्मा पथ पर आश्रित है। कार्य और ऊष्मा तंत्र की अवस्था के फलन नहीं हैं।
- किसी तंत्र की आंतरिक ऊर्जा तंत्र के अलग-अलग अवयवों की ऊर्जाओं का योग होती है। यह तंत्र की अवस्था का फलन होती है।

- ऊष्मागतिकी का प्रथम नियम यह है : जब किसी तंत्र में कोई प्रक्रिया हो रही होती है तब इसकी आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन का मान स्थानांतरित ऊष्मा की मात्रा और कार्य करने में खर्च हुई ऊष्मा की मात्रा के अंतर के बराबर होती है और समान प्रारंभिक अवस्थाओं और समान अंतिम अवस्थाओं से संबंधित सभी प्रक्रियाओं के लिए आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन समान रहता है।
- प्रथम नियम का अवकल रूप यह होता है।

$$\delta Q = dU + \delta W$$

3.9 अंत में कुछ प्रश्न

1. तापमान T_1 पर ऊष्मा के स्रोत को और तापमान T_2 पर ऊष्मा के अभिगम को परिभाषित करने के लिए भाग 3.2 में दी गई ऊष्मा की परिभाषा का प्रयोग कीजिए।

2. दो मोल आदर्श गैस, $0.050\ m^3$ का आयतन ग्रहण करती है और $2.6 \times 10^3\ Nm^{-2}$ का दाब डालती है। सम-आयतनिक रूप से इसे $0.035\ m^3$ तक संपीड़ित कर दिया गया है। गैस द्वारा किया कार्य और उसके तापमान में हुई कमी मालूम कीजिए। दिया है $R = 8.3\ J\ K^{-1}\ mol^{-1}$

3. 300 K पर एक आदर्श गैस $5 \times 10^6\ Nm^{-2}$ के दाब पर $0.2\ m^3$ का आयतन ग्रहण करती है। इसे तब तक समातापी रूप से फैलने दिया जाता है जब तक कि इसका आयतन $0.5\ m^3$ नहीं हो जाता। इसके बाद, गैस को समदाबी रूप से संपीड़ित करके उसे मूल आयतन (original volume) पर ला दिया जाता है। अंत में दाब में तब तक सम-आयतनिक रूप से वृद्धि की जाती है जब तक कि गैस अपनी मूल अवस्था में नहीं आ जाती। सूचक आरेख (indicator diagram) पर प्रक्रिया आलेखित कीजिए और चक्र के दौरान किया गया कार्य मालूम कीजिए।

4. बच्चे की सामान्य वृद्धि के लिए यह आवश्यक है कि उसकी आंतरिक ऊर्जा में वृद्धि हो — इस कथन पर अपनी टिप्पणी दीजिए।

5. मान लीजिए एक पूर्णतः ऊष्मारोधित पात्र में 500 g पानी है और इसे धीरे-धीरे हिलाया जा रहा है। यदि हम यह मान लें कि यह एक ऊष्मागतिक तंत्र है, तो प्रत्येक कथन के साथ कोष्ठक में दिए गए शब्दों में से उपयुक्त शब्द चुनकर निम्नलिखित वाक्यों के खाली स्थान भरिए।
   i) तंत्र से या तंत्र की ओर ऊष्मा ..... प्रवाहित होती है, प्रवाहित नहीं होती है।
   ii) तंत्र ..... कार्य किया गया है। (पर, द्वारा)
   iii) तंत्र के तापमान में ..... (वृद्धि होती है, कमी आती है)
   iv) तंत्र की आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन ..... होता है। (धनात्मक, ऋणात्मक)

6. एक तंत्र को नीचे दी गई सारणी (3.4) में बतायी गई चार प्रक्रियाओं के अधीन रखा गया है। यदि प्रविष्टियाँ जून में की गई हों, तो प्रत्येक प्रक्रिया के लिए खाली स्थान भरिए।

सारणी 3.4

प्रक्रिया	दी गई ऊष्मा δQ	किया गया कार्य δW	आंतरिक ऊर्जा		आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन dU
			प्रारंभिक U	अंतिम U_f	
I	30	0	—	30	—
II	—	30	30	—	20
III	60	—	0	—	40
IV	−20	—	15	40	—

3.10 हल और उत्तर

बोध प्रश्न

1. भट्टी के आंतरिक पृष्ठ तंत्र की परिसीमा है। तापमान में वृद्धि होने पर भट्टी की ऊर्जा में भी वृद्धि होती है। इस ऊर्जा का भट्टी में स्थानांतरण भट्टी और आस-पास की वायु के तापांतर के कारण नहीं होता। अतः स्थानांतरित

ऊर्जा ऊष्मा नहीं है।

यहाँ ऊर्जा-स्थानांतरण तापन अवयव में इलेक्ट्रानों के प्रवाह के कारण होता है और यह तंत्र परिसीमा पर होता है। अतः यह विभिन्न प्रकार का ऊर्जा-स्थानांतरण है।

2. क) कार्य, धनात्मक, बल, विस्थापन

ख) i) यहाँ तंत्र एक चुंबक है। इस स्थिति में चुंबक में आंतरिक समायोजन किया जाता है। अतः कोई कार्य नहीं किया गया है।

ii) इस स्थिति में धारा अपने परिवेश से कुंडली में प्रवाहित होता है और कुंडली को घूर्णन कराया गया है। अतः कार्य किया गया है।

ग) (i) + (ii) -

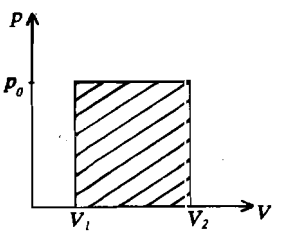
3. क) आदर्श गैस के लिए जिसमें अवस्था (p_i, V_i) से अवस्था (p_f, V_f) तक समतापी प्रक्रिया हो रही हो, $p_f V_f = p_i V_i$ इसलिए, $V_f/V_i = p_i/p_f$ और (3.4) में प्रतिस्थापन करने पर हमें यह प्राप्त होता है।

$$\Delta W_T = nRT \ln (p_i/p_f)$$

ख) क्योंकि तंत्र अचर दाब पर आयतन V_1 से V_2 तक फैलता है, इसलिए

$$\Delta W_p = \int_{V_1}^{V_2} \delta W = \int_{V_1}^{V_2} pdV = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

सूचक आरेख पर, पथ-V अक्ष के समांतर एक सरल रेखा है और तंत्र द्वारा किए गए कार्य को चित्र 3.16 में छायादार क्षेत्र से दिखाया गया है।



चित्र 3.16

4. हम जानते हैं कि धारा

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{या} \quad dq = idt$$

अतः समय t_i से समय t_f तक अचर धारा i सप्लाई करने में E विद्युत वाहक बल (emf) वाले विद्युत सेल द्वारा किया गया कार्य

$$\Delta W_E = -\int_{t_i}^{t_f} E\, i\, dt = -\, E\, i\, (t_f - t_i)$$

विभिन्न मानों को प्रतिस्थापित करने पर आप देखेंगे कि

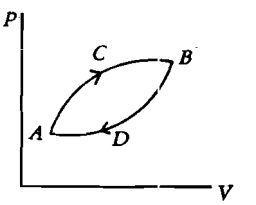
$$\Delta W_E = -\, 1.40\text{V} \times 0.15\text{A} \times 60\text{s} = -12.6\text{J}$$

(volt) (ampere) (second)
= (volt) (coulomb)
= joule

5. क) U अवस्था का एक फलन है और व्यापक रूप में p, V, T का एक फलन है। हमें यह सिद्ध करना है कि आदर्श गैस में U केवल T पर निर्भर करता है। यदि U, V पर निर्भर करता हो, तो तंत्र के आयतन में वृद्धि करने पर U में परिवर्तन होना चाहिए। अब, आयतन में वृद्धि करने पर अंतराअणुक अवकाश (intermolecular space) में वृद्धि होती है। यदि अंतरा-अणुक बल आकर्षी (attractive) होता तो अंतरण में वृद्धि होने पर बल के विरूद्ध कार्य किया गया होता और तंत्र की आंतरिक ऊर्जा में वृद्धि होती। यदि अंतरा-अणुक बल अपकर्षी (repulsive) होता तो U में कमी आ जाती। पर, क्योंकि कोई बल नहीं है, इसलिए U में कोई भी परिवर्तन नहीं होगा। अतः U, V पर निर्भर नहीं करता। इसी प्रकार यह सिद्ध किया जा सकता है कि U, p पर निर्भर नहीं करता। अतः यह केवल T पर निर्भर करता है।

ख) चित्र 3.17 देखिए। यह चित्र 3.10 की ही नकल है। प्रक्रिया ACB के दौरान आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन $(U_B - U_A)$ होता है और प्रक्रिया BDA के दौरान परिवर्तन $(U_A - U_B)$ होता है। अतः चक्रीय प्रक्रिया $ACBDA$ के दौरान कुल परिवर्तन यह होता है :

$$(U_B - U_A) + (U_A - U_B) = 0.$$



चित्र 3.17

6. लिया गया आहार वैसा ही है जैसे तंत्र द्वारा दी गई ऊष्मा और खर्च हुई ऊर्जा वैसी ही है जैसे तंत्र द्वारा किया गया कार्य। इस तरह,

$\delta Q = 10^4$ J प्रतिदिन

तथा $\delta W = 1.2 \times 10^4$ J प्रतिदिन

अतः प्रतिदिन आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन

$$dU = \delta Q - \delta W$$

$= (1.0 \times 10^4 - 1.2 \times 10^4)$ J

$= -2.0 \times 10^3$ J

यह कमी सुक्रोज में हुई कमी के संगत है। इसलिए प्रतिदिन सुक्रोज में हुई कमी

$$= \frac{2.0 \times 10^3}{1.6 \times 10^4} \text{ kg.}$$

$= 0.125$ kg.

अतः 1 kg की कमी लाने में $\frac{1}{0.125} = 8$ दिन लगेंगे।

7. क) ऊष्मारोधी या रुद्धोष्म तंत्र के लिए $\delta Q = 0$. अतः समीकरण (3.12) का परिष्कृत रूप $dU = -\delta W$ हो जाता है। इस तरह, हम यह पाते हैं कि ताप वियुक्त (isolated) तंत्र की आंतरिक ऊर्जा में कमी या वृद्धि तंत्र द्वारा या तंत्र पर किए गए कार्य के बराबर होती है। और, क्योंकि dU केवल प्रारंभिक और अंतिम अवस्थाओं पर निर्भर करता है और पथ से स्वतंत्र होता है, इसलिए रुद्धोष्म प्रक्रिया में किया गया कार्य भी दो साम्यावस्थाओं के बीच के पथ से स्वतंत्र होता है। वस्तुतः $\delta W = -dU$ से यह पता चलता है कि आंतरिक ऊर्जा की ही कीमत पर तंत्र द्वारा कार्य किया गया है।

   ख) i) $dU = \delta Q + B_a V\, dM$

   ii) $dU = \delta Q + Eidt$

   iii) $dU = \delta Q$

   ग) सम-आयतनिक, रुद्धोष्म, चक्रीय

   घ) ट्रे की वस्तुओं के लिए δW शून्य होता है, क्योंकि इसमें कोई गति नहीं होती, δQ ऋणात्मक होता है क्योंकि पानी से ऊष्मा की हानि होती है और dU भी ऋणात्मक होता है, क्योंकि तंत्र का तापमान गिरने लगता है।

अंत में कुछ प्रश्न

1. तापमान T_1 पर ऊष्मा का स्रोत एक पिंड या तंत्र है जो कोई कार्य किए बिना अपने परिवेश को या अचर ताप T_1 पर इसके संपर्क में रखे पिंड को ऊष्मा प्रदान करता है। तापमान T_2 पर ऊष्मा का अभिगम एक पिंड होता है जो कोई कार्य किए बिना अपने परिवेश से ऊष्मा प्राप्त करता है और तापमान T_2 पर बना रहता है।

2. समदाबी प्रतिबंध के अधीन गैस द्वारा किया गया कार्य

$$\triangle W_p = p\,(V_f - V_i)$$

इसमें संख्यात्मक मान रखने पर हमें यह प्राप्त होता है।

$$\triangle W_p = 2.6 \times 10^5 \times (0.035 - 0.050) \text{ J}$$
$$= -3.9 \times 10^3 \text{ J}$$

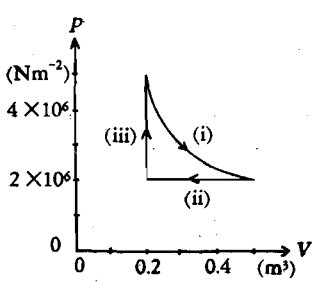
ऋण चिन्ह से यह पता चलता है कि गैस पर कार्य किया गया है। अब, क्योंकि आदर्श गैस के लिए अवस्था समीकरण $pV = nRT$ है इसलिए हम लिख सकते हैं कि

$$\triangle W_p = nR\,(T_f - T_i) = nR\,\triangle T$$

अतः तापमान परिवर्तन

$$\triangle T = \frac{\triangle W_p}{nR} = -\frac{3.9 \times 10^3 \text{J}}{(2 \text{ mol}) \times (8.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1})} = -2.3 \times 10^2 \text{ K}$$

इस तरह, गैस के तापमान में 2.3×10^2 K की कमी आ जाती है।



चित्र 3.18

3. चक्रीय प्रक्रिया को चित्र 3.18 में दिखाया गया है। क्योंकि गैस आदर्श है, इसलिए इसके अवस्था समीकरण से आप लिख सकते हैं कि

$$n = \frac{pV}{RT}$$

दिए हुए मानों को प्रतिस्थापित करने पर हमें यह प्राप्त होता है

$$n = \frac{(5 \times 10^6 \text{Nm}^{-2}) \times (0.2 \text{ m}^3)}{(8.3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) \times (300 \text{ K})}$$
$$= 4.0 \times 10^2 \text{ mol}$$

i) समतापी पथ के लिए

$V_i = 0.2\text{m}^3$, $V_f = 0.5\text{m}^3$, $p_i = 5 \times 10^6\ \text{Nm}^{-2}$

इसलिए,

$$p_f = \frac{p_i V_i}{V_f} = \frac{(5 \times 10^6\,\text{Nm}^{-2}) \times (0.2\,\text{m}^3)}{(0.5\,\text{m}^3)} = 2 \times 10^6\,\text{Nm}^{-2}$$

इस प्रक्रिया में किया गया कार्य

$$W^{(i)} = nRT \ln (V_f/V_i)$$
$$= (4.0 \times 10^2\,\text{mol}) \times (8.3\,\text{J mol}^{-1}\,\text{K}^{-1}) \times (300\,\text{K}) \ln (0.5/0.2)$$
$$= 9.2 \times 10^5\,\text{J}$$

ii) $2 \times 10^6\ \text{Nm}^{-2}$ दाब पर 0.5 m^3 से 0.2 m^3 तक संपीड़ित करने में गैस द्वारा किया गया कार्य

$$W^{(ii)} = p\triangle V = (2 \times 10^6\,\text{Nm}^{-2}) \times (0.3\,\text{m}^3) = 6 \times 10^5\,\text{J}$$

iii) सम-आयतनिक पथ पर किया गया कार्य = 0. अतः चक्र में किया गया कुल कार्य

$$\triangle W = \triangle W^{(i)} - \triangle W^{(ii)}$$
$$= (9.16 - 6) \times 10^5\,\text{J} = 3.16 \times 10^5\,\text{J}$$

4. वृद्धि के लिए लिया गया आहार (δQ) किए गए कार्य (δW) से अधिक होना चाहिए जिससे कि शेष आहार बच्चे की वृद्धि में सहायक होता है। अतः ऊष्मागतिकी के प्रथम नियम के अनुसार

$$dU = \delta Q - \delta W > 0$$

अतः आंतरिक ऊर्जा में वृद्धि होती है।

5. i) प्रवाहित नहीं होता
   ii) पर
   iii) बढ़ता है
   iv) धनात्मक

6. पूरी की गई सारणी यह है

सारणी 3.5

प्रक्रिया	दी गई ऊष्मा	किया गया कार्य	आंतरिक ऊर्जा		आंतरिक ऊर्जा में परिवर्तन
			प्रारंभिक U_i	अंतिम U_f	dU
I	30	0	0	30	30
II	50	30	30	50	20
III	60	20	0	40	40
IV	−20	45	15	40	25

3.11 शब्दावली

अवन	oven
अंतरा-अणुक	intermolecular
अनुचुंबकीय	paramagnetic
अभिगम	sink
गुप्त ऊष्मा	latent heat
परिवेश	surroundings
यथातथ अवकल	exact differential
रुद्धोष्म	adiabatic

सम-आयतनिक	isochoric
समतापी	isothermal
समदाबी	isobaric
स्रोत	source