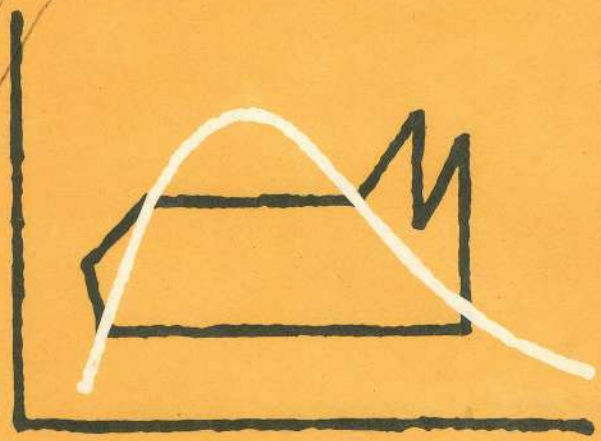
প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা

এম. এ. কাইউম
এ. এম. আজিজ-উল হক



প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা

[ENGINEERING THERMODYNAMICS]

BANSDOC Library
Dhaka

এম. এ. কাইউম
প্রফেসর
এ.এম.এ আন্তর্জাতিক বিশ্ববিদ্যালয়
বাংলাদেশ

এ. এম. আজিজ-উল হক
প্রফেসর, যন্ত্রকৌশল বিভাগ
বাংলাদেশ প্রকৌশল বিশ্ববিদ্যালয়
ঢাকা

বাংলা একাডেমী ঢাকা

BANSDOC Library
Accession No. 17938
Date 20.6.04

প্রথম প্রকাশ
জ্যৈষ্ঠ ১৪০৮
মে ২০০১

বাএ (২০০০–২০০১ পাঠ্যপুস্তক : ভৌ ও প্র ৮) ৪১৫৯

মুদ্রণ সংখ্যা ১২৫০

পাণ্ডুলিপি প্রণয়ন ও মুদ্রণ তত্ত্বাবধান
ভৌতবিজ্ঞান ও প্রকৌশল উপবিভাগ

ভৌ ও প্র ২০৮

প্রকাশক
সুব্রত বিকাশ বড়ুয়া
পরিচালক
পাঠ্যপুস্তক বিভাগ
বাংলা একাডেমী, ঢাকা

মুদ্রক
মোঃ হামিদুর রহমান
ব্যবস্থাপক
বাংলা একাডেমী প্রেস
ঢাকা–১০০০

প্রচ্ছদ
মামুন কায়সার

মূল্য : ৮০.০০

PROKOUSHAL TAPGATIBIDYA (Engineering Thermodynamics) by M.A. Quaiyum, Professor, AMA International University, Bangladesh and A.M. Aziz-ul Huq, Professor, Mechanical Engineering Department, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka. Published by Subrata Bikash Barua, Director, Textbook Division, Bangla Academy, Dhaka, Bangladesh. First edition, May 2001. Price : Taka 80.00 only.

ISBN 984-07-4168-3

উৎসর্গ

আমাদের উভয়ের আম্মা ও আব্বাকে

ভূমিকা

বিজ্ঞান ও প্রযুক্তির যে কোনো শাখার মতো প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা উন্নয়নের ইতিহাস পর্যালোচনা করলে বিজ্ঞানী ও প্রকৌশলীদের বিভিন্ন কার্যক্রমের সফলতা ও ব্যর্থতা সম্বন্ধে সম্যক ধারণা করা যায়। তবে বিষয়টির উৎকর্ষের গতিপথে এ রকমও দেখা গেছে যে দীর্ঘদিন ধরে কিছু কিছু ধারণা যা আদৌ সত্যের উপর প্রতিষ্ঠিত নয়, জোর করে ধরে রাখার প্রবণতা অনেকের মধ্যেই রয়ে গেছে। অপরদিকে বেশ কিছু গবেষক প্রায় একই সময়ে এবং একে অপরের সাথে কোনো প্রকার মতবিনিময় বা যোগাযোগ ছাড়াই নিজেদের গবেষণাকর্মে গতি সঞ্চার করে স্ব স্ব উদ্ভাবনে চরম উৎকর্ষ লাভে সক্ষম হয়েছেন। কাজেই এক বিন্দু থেকে অন্য বিন্দু অথবা একাধিক বিন্দু যোগ করে যেভাবে সরলরেখা টানা যায় সে রকম সহজভাবে এই বিষয়টির উপস্থাপন মোটেই সম্ভব নয়। এটি মনে রেখেই প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা অধ্যয়নে এবং পাঠদানে মনোনিবেশ করা প্রয়োজন। বলা বাহুল্য এ কথাটি স্মরণ রেখেই প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা গ্রন্থটি প্রণয়ন করা হয়েছে।

প্রকৌশলী উইলিয়ম জন ম্যাকর্ন র‍্যাঙ্কিনকে (1820-1872) প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা সংক্রান্ত পাঠ্যপুস্তক রচনার পথিকৃৎ হিসেবে ধরা হয়। তিনি ১৮৫৯ সালে সর্বপ্রথম এই বিষয়ের উপর পাঠ্যপুস্তক রচনা করেন। এক শতাব্দী এবং চার দশক সময়ের ব্যবধানে উৎকর্ষের নিরিখে সংশ্লিষ্ট বিষয় ও প্রকাশনা শিল্পের যে অবস্থান তাতে নিঃসন্দেহে ইতোমধ্যে অসংখ্য গ্রন্থ প্রকাশিত হয়েছে। কিন্তু দুঃখজনক ব্যাপার হলো এই যে, বাংলা ভাষায় এ বিষয়ে প্রকাশিত পাঠ্যপুস্তকের সংখ্যা অত্যন্ত নগণ্য। হাতে গোনা যে কয়টি প্রকাশনা রয়েছে তাতে প্রকৌশলগত দিকটা তেমন গুরুত্বের সাথে স্থান পায়নি। প্রধানত এই শূন্যস্থান পূরণ এবং বিশ্ববিদ্যালয় পর্যায়ে শিক্ষাদানকালের দীর্ঘ অভিজ্ঞতায় আমরা লক্ষ্য করেছি যে, ইংরেজি ভাষাজ্ঞানের দুর্বলতার জন্য অনেক ছাত্র প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যার জটিল বিষয়গুলো অনুধাবন করে পুরোপুরিভাবে আয়ত্ত করতে পারে না। বিষয়টি স্মরণে রেখেই গ্রন্থটি প্রণয়নে আমরা ব্রতী হই। আমাদের ধারণা এটি প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা সংক্রান্ত বিভিন্ন বিদেশী পাঠ্যপুস্তকের সহায়ক হিসেবেও কাজে আসবে। প্রকৃতপক্ষে কোনো বিষয়ে ব্যুৎপত্তি লাভ করতে হলে একই সাথে বিভিন্ন গ্রন্থের সাহায্য নিতে হয়। কারণ, ক্ষেত্রবিশেষে বিভিন্ন গ্রন্থে বিশেষ বিশেষ পাঠ্য বিষয়ের উপস্থাপনা, ভাষা, বর্ণনা ও ব্যাখ্যার গুণে অনন্য ব্যঞ্জনার সৃষ্টি হয়।

উপর্যুক্ত উদ্দেশ্যগুলো সামনে রেখে অধ্যয়ন, অধ্যাপনা, গবেষণা ও গবেষণা তত্ত্বাবধান ও পরিচালনার দীর্ঘ অভিজ্ঞতার আলোকে আমাদের এই ক্ষুদ্র প্রয়াস। পাঠ্যক্রম এমনভাবে সাজানো হয়েছে যাতে প্রথমে শিক্ষার্থীরা অতি সহজ এবং সাধারণ বিষয় বস্তুসমূহের পারস্পরিক সম্পর্ক ও তাদের প্রয়োগ সম্বন্ধে জ্ঞান লাভ করে প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যার মৌলিক বিষয় ও এর ব্যবহার সম্বন্ধে পড়াশোনা করতে পারে। প্রত্যেক বিষয়ের উপর

BANSDOC Library
Accession No. 17938

উদাহরণগুলো এমনভাবে সমাধান করে দেয়া হয়েছে যাতে উপস্থাপিত প্রতিটি তাত্ত্বিক বিষয়ের পটভূমি এবং অন্তর্নিহিত তত্ত্ব ও তাদের প্রয়োগ সম্বন্ধে তারা সম্যক ধারণা করতে পারে। এই গ্রন্থে সমাধানের ধারাটি এমনভাবে বিন্যস্ত করা হয়েছে যাতে সংশ্লিষ্ট প্রক্রিয়াটি সম্বন্ধে পরিষ্কার ধারণা লাভ করা যায়। ফলে কি কি তথ্য তাতে দেয়া হয়েছে এবং কি কি তথ্য বের করতে হবে বা কি কি তথ্যের অভাব রয়েছে তা সহজেই নির্ণয় করা যায়। অতঃপর তাপগতিবিদ্যার বিভিন্ন সম্পর্কসংক্রান্ত সমীকরণ ব্যবহার করে সরবরাহকৃত তথ্যের সাথে প্রয়োজনীয় তথ্য যা উদাহরণে বের করতে বলা হয়েছে তার সাথে একটি সম্পর্ক স্থাপন করাই যে সমস্যাটির সমাধান তা খুব সহজেই উপলব্ধি করতে পারবে। এরূপ সমাধানে কিভাবে বিভিন্ন চার্ট, সারণি, ডায়াগ্রাম ইত্যাদি পর্যালোচনা করে উদ্দিষ্ট তাপগতিবিদ্যা ধর্মটি বের করতে হবে সে সম্বন্ধে ধারণা দেয়ার সহায়ক হিসেবে এ সমস্ত উদাহরণ বিশেষ উপকারে আসবে বলে আমাদের বিশ্বাস।

গ্রন্থের আর একটি বিশেষত্ব এই যে, এতে বাংলাদেশ প্রকৌশল বিশ্ববিদ্যালয়, দেশের অন্যান্য বেসরকারি বিশ্ববিদ্যালয় এবং বাংলাদেশ ইনস্টিটিউট অব টেকনোলজিসমূহের স্নাতক শ্রেণীর প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যার পাঠ্যসূচি অনুসরণ করা হয়েছে। কাজেই প্রকৌশল বিভাগের বাংলাভাষী সমস্ত ছাত্র প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যার প্রয়োজনীয় বিষয়গুলো অতি সহজেই এতে খুঁজে পাবে বলে আমাদের বিশ্বাস।

গ্রন্থটি লেখার ব্যাপারে যাঁরা উৎসাহ দিয়েছেন তাঁদেরকে ধন্যবাদ জানাই। এর খসড়া কম্পোজ করার জন্য মোহাম্মদ শহিদ উল্লাহর কাছে আমরা কৃতজ্ঞ। গ্রন্থটি মুদ্রণের জন্য বাংলা একাডেমী কর্তৃপক্ষের কাছে আমরা কৃতজ্ঞ।

পরিশেষে যাদের জন্য এ গ্রন্থটি প্রণীত হয়েছে, তাদের প্রয়োজনে লাগলে আমাদের পরিশ্রম সার্থক বলে মনে করব। গ্রন্থটির উৎকর্ষের জন্য যে কোনো প্রকার মন্তব্য, সংযোজন, উপদেশ, সমালোচনা ইত্যাদি সাদরে গ্রহণ করা হবে।

এম. এ. কাইউম

এ. এম. আজিজ-উল হক

সূচিপত্র

প্রথম অধ্যায় : **তাপগতিবিদ্যার প্রাথমিক ধারণা ও সংজ্ঞা** ১-৮

১.১ তাপগতিবিদ্যা ও প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা

১.২ তাপগতীয় ব্যবস্থা

১.৩ ধর্ম, অবস্থা, প্রক্রিয়া এবং চক্র

১.৪ চক্র

১.৫ কাজ ও তাপ

১.৬ তাপগতিবিদ্যার 'শূন্য সূত্র'

১.৭ তাপগতিবিদ্যার তৃতীয় সূত্র

দ্বিতীয় অধ্যায় : **বিশুদ্ধ বস্তু** ৯-১৭

২.১ সংজ্ঞা ও ধারণা

২.২ বিশুদ্ধ বস্তুর গুণাবলি

২.৩ বিশুদ্ধ বস্তুর P–V–T সম্পর্ক

২.৪ সারণি থেকে বিশুদ্ধ বস্তুর গুণাবলি নির্ণয়

তৃতীয় অধ্যায় : **তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র** ১৮-৩১

৩.১ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র

৩.২ অন্তস্থ শক্তি : প্রথম সূত্রের অনুসিদ্ধান্ত-১

৩.৩ শক্তি প্রয়োগ ব্যতীত কোনো যন্ত্রের অনন্তকালব্যাপী চালু থাকা সম্ভব নয়

৩.৪ বদ্ধ ব্যবস্থায় প্রথম সূত্রের প্রয়োগ

৩.৫ প্রবাহিত ও উন্মুক্ত অবস্থায় প্রথম সূত্রের প্রয়োগ

৩.৬ অন্তস্থ শক্তি, এনথালপি ও আপেক্ষিক তাপ

প্রশ্নমালা

চতুর্থ অধ্যায় : **তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র** ৩২-৬৬

৪.১ ক্লসিয়াসের সংজ্ঞা

৪.২ দ্বিতীয় সূত্রের ব্যবহার

৪.৩ প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া
৪.৪ প্রত্যাবর্তী চক্র
৪.৫ কার্নোর অনুসিদ্ধান্ত
৪.৬ র‍্যাঙ্কিন চক্র
৪.৭ পারমাণবিক চুল্লিতে র‍্যাঙ্কিন চক্রের ব্যবহার
৪.৮ বিরতিহীন যন্ত্র
প্রশ্নমালা

পঞ্চম অধ্যায় : এনট্রপি ৬৭-৭৩
৫.১ সংজ্ঞা
৫.২ এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয়
প্রশ্নমালা

ষষ্ঠ অধ্যায় : গ্যাস এবং বাষ্পের মিশ্রণ ৭৪-৯০
৬.১ আদর্শ এবং প্রকৃত গ্যাসের তুলনা
৬.২ আংশিক চাপ এবং মোট চাপ
৬.৩ মিশ্রিত গ্যাস ও বাষ্পের এমন অবস্থা যখন বাষ্পের দশা পরিবর্তনশীল
প্রশ্নমালা

সপ্তম অধ্যায় : প্রাপ্যতা এবং অপ্রত্যাবর্তনশীলতা ৯১-৯৫
৭.১ কার্যক্ষমতা
৭.২ সর্বোচ্চ কাজ
প্রশ্নমালা

অষ্টম অধ্যায় : তাপগতিবিদ্যার সম্পর্ক এবং অবস্থার সমীকরণমালা ৯৬-১০৪
৮.১ তাপগতিবিদ্যার সম্পর্ক
৮.২ অবস্থার সমীকরণ
প্রশ্নমালা

নবম অধ্যায় : **জ্বালানি এবং দহন** ১০৫-১১৬

৯.১ জ্বালানি
৯.২ বাংলাদেশের জ্বালানির উৎসসমূহ
৯.৩ দহন প্রক্রিয়া
৯.৪ স্টইকিওমেট্রিক মিশ্রণ
প্রশ্নমালা

দশম অধ্যায় : **তাপগতিবিদ্যায় ব্যবহৃত কয়েকটি চক্র** ১১৭-১৪০

১০.১ হিট ইঞ্জিন
১০.২ আদর্শ অটো চক্র
১০.৩ ডিজেল চক্র
১০.৪ গ্যাস টারবাইন
১০.৫ বাষ্পের বিভিন্ন চক্র : র‍্যাঙ্কিন চক্র, রিজেনারেটিভ চক্র, রিহিট চক্র
১০.৬ রেফ্রিজারেশন ব্যবস্থা
১০.৭ প্রশ্নমালা

পরিশিষ্ট ১৪১-১৬০

গ্রন্থপঞ্জি ১৬১-১৬২

নির্ঘণ্ট ১৬৩-১৬৪

পরিভাষা ১৬৫-১৬৮

প্রথম অধ্যায়

তাপগতিবিদ্যার প্রাথমিক ধারণা ও সংজ্ঞা

১.১ তাপগতিবিদ্যা ও প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা

তাপগতিবিদ্যা বিজ্ঞানে কাজ, তাপ, বস্তুর ধর্ম এবং এদের পারস্পরিক সম্পর্ক নিয়ে আলোচনা করা হয়। অন্যদিকে প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা (Engineering Thermodynamics) বিজ্ঞানে উপরিউক্ত বিষয়গুলোসহ তাপের পরিবর্তন সংক্রান্ত বিভিন্ন যন্ত্রের পরিকল্পনা, নকশা (design) এবং তদ্‌সংক্রান্ত বিষয়গুলোর বিভিন্ন দিক বিশ্লেষণ (analysis) করা হয়।

প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যার ব্যবহার প্রায় সর্বত্র। বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্রের বিভিন্ন যন্ত্রে, বাড়িতে ব্যবহৃত ফ্রিজ, কুলার, এয়ার কন্ডিশনিং ব্যবস্থায়, গাড়ির ইঞ্জিনে, ইলেকট্রিক ও ইলেকট্রোনিক যন্ত্রপাতি শীতলীকরণ ইত্যাদিসহ এ ধরনের আরো অনেক যন্ত্রপাতিতে প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যার ব্যবহার লক্ষ্য করা যায়।

উল্লেখ করা যেতে পারে যে, কাজ, তাপ ও বস্তুর ধর্ম এই তিনটিই একে অন্যের সাথে ওতপ্রোতভাবে জড়িত এবং এদের পারস্পরিক সম্পর্ক নিয়ে বিস্তারিত আলোচনার পূর্বে নিচের বিষয়গুলো সম্পর্কে ধারণা দেয়া বিশেষ প্রয়োজন।

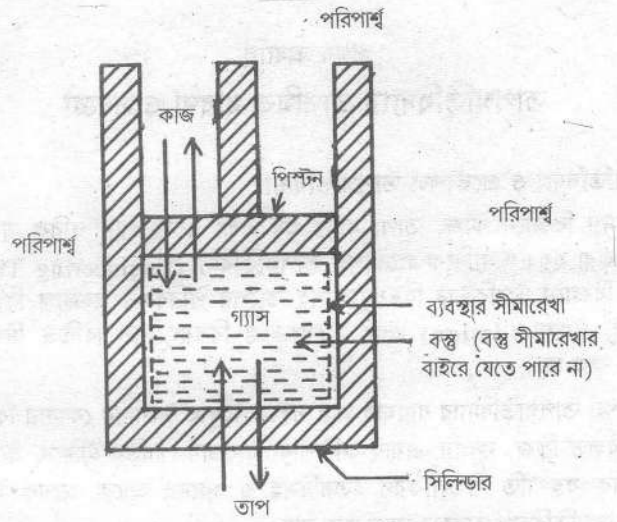
১.২ তাপগতীয় ব্যবস্থা (Thermodynamic System)

সীমারেখা দিয়ে আবদ্ধ কোনো নির্দিষ্ট পরিমাণ বস্তু বা এলাকা যা বিশ্লেষণ (analysis) করা হয় তাকে তাপগতীয় ব্যবস্থা বলা হয়। মনে রাখা দরকার যে, এই সীমারেখা বা বেষ্টনী (boundary) বাস্তব হতে পারে অথবা কাল্পনিকও হতে পারে এবং এই সীমারেখার আকার পরিবর্তনশীল (deformable) হতে পারে আবার অপরিবর্তনীয়ও হতে পারে। এ গ্রন্থে তাপগতীয় ব্যবস্থাকে কোনো কোনো সময় শুধু ব্যবস্থা (system) বলে উল্লেখ করা হয়েছে।

১.২.১ পরিপার্শ্ব (Surroundings) : তাপগতীয় ব্যবস্থার সীমারেখার বাইরে অবস্থিত সব কিছুকেই পরিপার্শ্ব বলা হয়। এই পরিপার্শ্ব ব্যবস্থার উপর বিভিন্ন রকম প্রভাব বিস্তার করে। নিচে তিন ধরনের ব্যবস্থার বর্ণনা দেয়া হলো।

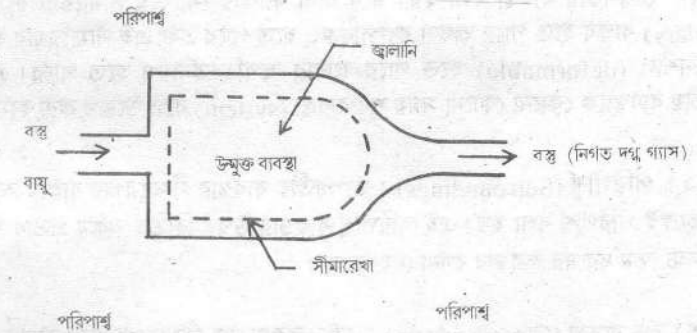
(ক) বদ্ধ ব্যবস্থা (Closed system) : এই ব্যবস্থায় বস্তু সীমারেখা দিয়ে আবদ্ধ থাকে এবং সীমারেখার বাইরে যেতে পারে না। এই ব্যবস্থায় বস্তুর পরিমাণ অপরিবর্তিত থাকে। শুধু

শক্তি (কাজ ও তাপ) এই বদ্ধ ব্যবস্থার সীমারেখা অতিক্রম করতে পারে। ১.১ চিত্রে একটি বদ্ধ ব্যবস্থা দেখানো হলো।



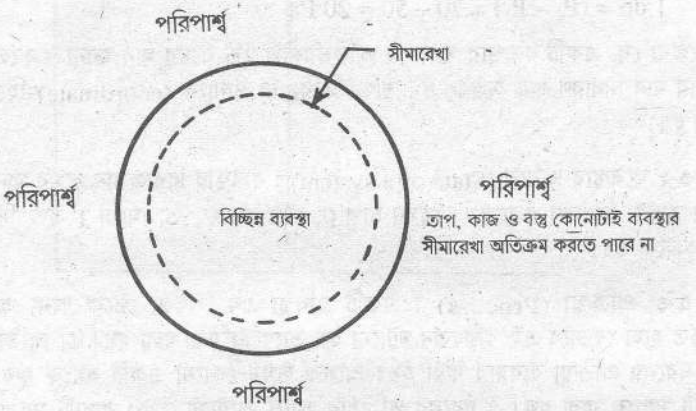
চিত্র ১.১ : বদ্ধ ব্যবস্থার উদাহরণ।

(খ) **উন্মুক্ত ব্যবস্থা** (Open system) : এই ব্যবস্থায় বস্তু এবং শক্তি (কাজ ও তাপ) উভয়ই ব্যবস্থার সীমারেখা অতিক্রম করতে পারে। অনেক সময় এই ব্যবস্থাকে নিরীক্ষার আয়তনও (control volume) বলা হয়ে থাকে। ১.২ চিত্রে উন্মুক্ত ব্যবস্থা দেখানো হলো।



চিত্র ১.২ : উন্মুক্ত ব্যবস্থার উদাহরণ (জেট ইঞ্জিন)।

(গ) বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থা (Isolated system) : এই ব্যবস্থায় বস্তু এবং শক্তি (কাজ ও তাপ) কোনোটিই ব্যবস্থার সীমারেখা অতিক্রম করতে পারে না। পরিপার্শ্ব এবং ব্যবস্থা একে অন্যের উপর কোনো রকম প্রভাব বিস্তার করতে পারে না, অর্থাৎ পারস্পরিক ক্রিয়া-প্রতিক্রিয়া নেই। ১.৩ চিত্রে বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থা দেখানো হলো।



চিত্র ১.৩ : বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থার উদাহরণ।

১.৩ ধর্ম (Property), অবস্থা (State), প্রক্রিয়া (Process) এবং চক্র (Cycle)

১.৩.১ ধর্ম (Property) : ধর্ম বা গুণ বলতে একটি ব্যবস্থার লক্ষণীয় প্রকৃতি বা বৈশিষ্ট্য বুঝায়। চাপ, তাপমাত্রা, আয়তন ইত্যাদি ধর্মের উদাহরণ। উল্লেখ করা যেতে পারে যে, দুটি ধর্মের সমন্বয়ে আর একটি নতুন ধর্ম সৃষ্টি হয় যা অবস্থার বিশ্লেষণে মাঝে মাঝে প্রয়োজন হয়।

অনেক ধর্ম আবার সরাসরি লক্ষণীয় নাও হতে পারে, যেমন অন্তস্থ শক্তি (internal energy), এনথালপি, এনট্রপি ইত্যাদি যা পরবর্তী অধ্যায়গুলোতে আলোচনা করা হবে।

১.৩.১.১ প্রকারভেদ অনুযায়ী ধর্ম মোটামুটি তিন রকম হতে পারে। যেমন :

ক. নিবিড় ধর্ম (Intensive property) : এই ধর্ম ব্যবস্থার বস্তুর পরিমাণের উপর নির্ভরশীল নয়, উদাহরণস্বরূপ— তাপমাত্রা (Temperature)

খ. বিস্তৃত ধর্ম (Extensive property) : এই ধর্ম ব্যবস্থার বস্তুর পরিমাণের উপর নির্ভর করে। উদাহরণস্বরূপ— ভর (mass)

গ. আপেক্ষিক ধর্ম (Specific property) : বিস্তৃত ধর্মকে ব্যবস্থার বস্তুর পরিমাণ (mass) দিয়ে ভাগ করলে ভাগফলকে আপেক্ষিক ধর্ম বলে। উদাহরণস্বরূপ $v = V/m$, v = আপেক্ষিক আয়তন, V = আয়তন, m = ভর। আপেক্ষিক ধর্মকে ছোট অক্ষর দিয়ে সাধারণত দেখানো হয়।

বিশেষভাবে মনে রাখা দরকার যে, ধর্মের মান শুধু ব্যবস্থার অবস্থার উপর নির্ভর করে। ধর্মের মান কোনো প্রক্রিয়ার উপর নির্ভর করে না। অর্থাৎ যদি একটি ব্যবস্থার গ্যাসের প্রথম অবস্থার চাপ $P_1 = 50$ Pa এবং দ্বিতীয় অবস্থার চাপ $P_2 = 70$ Pa এই ব্যবস্থা P_1 থেকে P_2 তে যে প্রক্রিয়াতেই যাক না কেন এই ব্যবস্থার চাপের পরিবর্তন

$$\int dp = (P_2 - P_1) = 70 - 50 = 20 \text{ Pa}$$

উল্লেখ্য যে, একটি ব্যবস্থার পরস্পর অনির্ভরশীল দুটি ধর্মের মান জানা থাকলে অন্য ধর্মগুলোর মান নির্ধারণ করা সম্ভব। ধর্ম তাপগতিবিদ্যার স্থানাংক (coordinate) হিসেবেও ব্যবহৃত হয়।

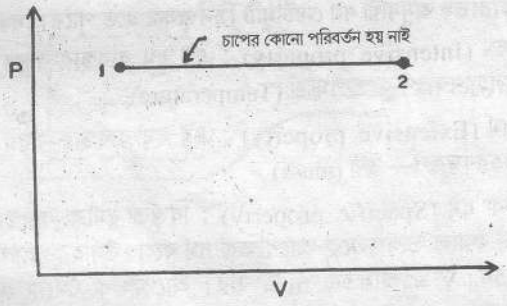
• **১.৩.২ ব্যবস্থার অবস্থা** (State of a system) : ব্যবস্থার বিরাজমান ধর্মের মান দিয়ে ব্যবস্থার অবস্থা নির্ধারণ করা হয়। যেমন চাপ P, আয়তন V, তাপমাত্রা T ইত্যাদি দিয়ে অবস্থা বুঝানো হয়।

১.৩.৩ প্রক্রিয়া (Process) : একটি ব্যবস্থা এক অবস্থা থেকে অন্য অবস্থায় পরিবর্তিত হলে যেভাবে এই পরিবর্তন ঘটানো হয় তাকে প্রক্রিয়া বলা হয়। তাপগতিবিদ্যায় অনেক ধরনের প্রক্রিয়া ব্যবহার করা হয়। অনেক সময় কোনো একটি ধর্মকে ধ্রুব রেখে প্রক্রিয়াটি সম্পন্ন করা হয়। এ ধরনের প্রক্রিয়ার আগে আইসো (iso) কথাটি মাঝে মাঝে ব্যবহার করা হয়, যেমন— ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়া (Isobaric process, constant pressure process)।

একটি প্রক্রিয়া এক অবস্থা থেকে অন্য অবস্থায় যাওয়ার সময় অনেকগুলো অন্তর্বর্তীকালীন অবস্থার মধ্যে দিয়ে যায়, এগুলোর সংযোগফলকে পথ (path) বলা হয়।

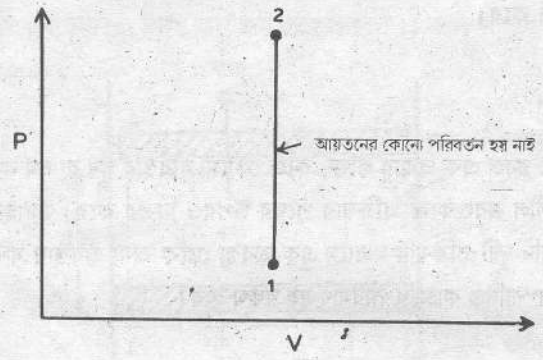
নিচে কয়েকটি প্রক্রিয়ার উদাহরণ দেয়া হলো :

(ক) ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়া (Constant pressure process) : এই প্রক্রিয়াটি বুঝানোর জন্য ১.৪ চিত্রে P এবং V কে স্থানাংক হিসেবে ব্যবহার করা হলো। এই প্রক্রিয়ায় চাপের কোনো পরিবর্তন হয় না।



চিত্র ১.৪ : ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়া।

(খ). **ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া** (Constant volume process) : এই প্রক্রিয়ার P এবং V–কে স্থানাংক হিসেবে ব্যবহার করা হলো। এই প্রক্রিয়ায় আয়তনের কোনো পরিবর্তন হয় না।

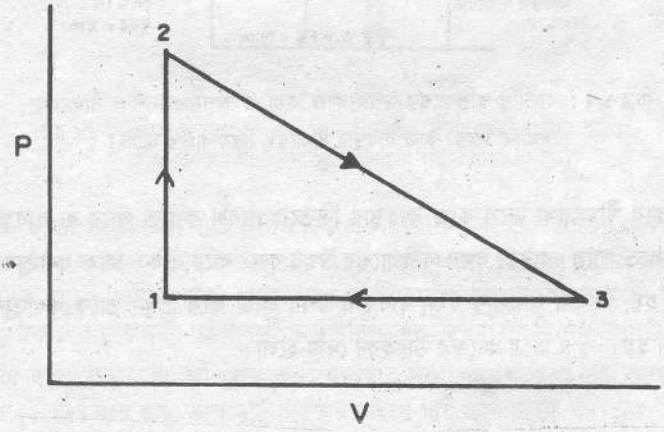


চিত্র ১.৫ : ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া।

আরো কয়েকটি প্রক্রিয়া রয়েছে যেমন সমোষ্ণ প্রক্রিয়া, রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়া, পলিট্রপিক প্রক্রিয়া ইত্যাদি যা পরে আলোচনা করা হয়েছে।

১.৪ চক্র (Cycle)

যদি কোনো ব্যবস্থা প্রথম একটি অবস্থা থেকে আরম্ভ করে বিভিন্ন প্রক্রিয়া সম্পন্ন করার পর পুনরায় প্রথম অবস্থায় ফিরে আসে তাহলে সেই ব্যবস্থা একটি চক্র সম্পন্ন করেছে বলা হয়।

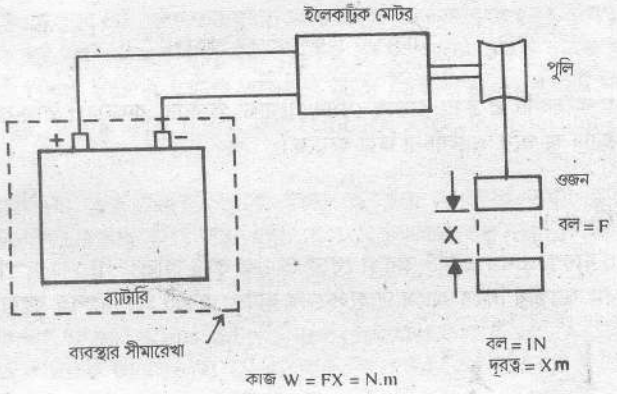


চিত্র ১.৬ : চক্র দেখানো হলো।

ব্যবস্থাটি চক্র আরম্ভ হওয়ার সময় যে অবস্থায় ছিল, চক্র সম্পন্ন করার পর পুনরায় সেই অবস্থায় ফিরে আসে। ১.৬ চিত্রে উদাহরণ দেয়া হলো। ব্যবস্থাটি 1 নং অবস্থা থেকে আরম্ভ করে 1-2, 2-3 এবং 3-1 প্রক্রিয়া সম্পন্ন করে পুনরায় 1 নং অবস্থায় ফিরে আসে এবং একটি চক্র সম্পন্ন করে।

১.৫ কাজ ও তাপ

১.৫.১ কাজ (work) : কাজ এক প্রকার শক্তি, কাজ কোনো ব্যবস্থার গুণ বা ধর্ম নয়। কাজ প্রক্রিয়ার উপর নির্ভরশীল এবং কাজ প্রক্রিয়ার পথের উপরও নির্ভর করে। উদাহরণস্বরূপ বলা যেতে পারে যে, যদি দুটি প্রক্রিয়ার মাধ্যমে এক অবস্থা থেকে অন্য অবস্থায় যাওয়া যায় তাহলে দুটি প্রক্রিয়ায় সম্পাদিত কাজের পরিমাণ দুই রকম হবে।



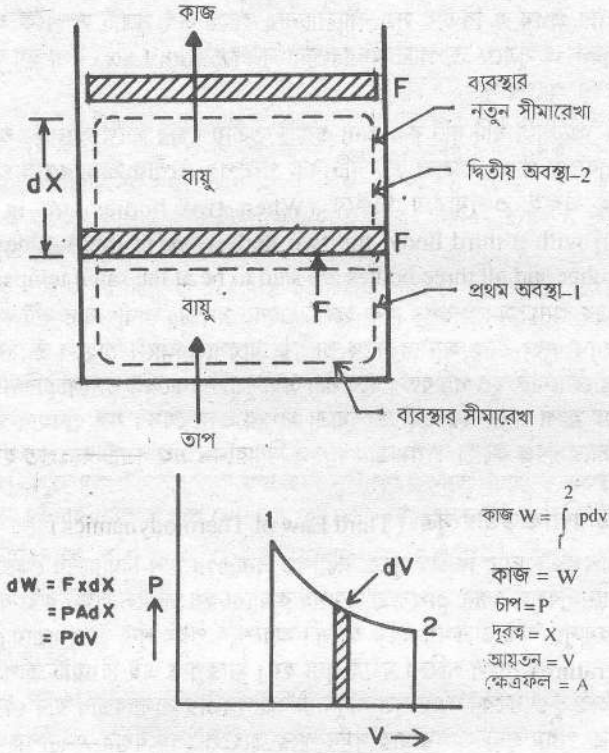
চিত্র ১.৭ : ব্যাটারি পরিপার্শ্বের উপর কাজ করা ও অপরিবর্তনশীল সীমারেখা দেখানো হলো। কাজ ব্যবস্থার সীমারেখা দিয়ে বাইরে যাচ্ছে।

ব্যবস্থার সীমারেখা দিয়ে কাজ ব্যবস্থার ভিতরে প্রবেশ করতে পারে বা ব্যবস্থা থেকে বাইরেও যেতে পারে। ব্যবস্থা যখন পরিপার্শ্বের উপর কাজ করে তখন তাকে ধনাত্মক (+ve) কাজ ধরা হয়, আবার পরিপার্শ্ব যখন ব্যবস্থার উপর কাজ করে তখন তাকে ঋণাত্মক কাজ (–ve) ধরা হয়। ১.৭ চিত্রে কাজের উদাহরণ দেয়া হলো।

বিশেষভাবে উল্লেখ্য যে, কাজের পরিমাণ নির্ণয়ের জন্য 1 থেকে 2 এ যাবার প্রক্রিয়া (পথ) সম্পর্কে ধারণা থাকা বিশেষ প্রয়োজন।

কাজের একক জুল (Joule), J, 1 J = (1 N) (1 m)

যদি 1N বল 1m দূরত্ব অতিক্রম করে তাহলে 1J কাজ সম্পন্ন হয়েছে বুঝায়।



চিত্র ১.৮ : কাজের উদাহরণ এবং পরিবর্তনশীল সীমারেখা দেখানো হলো। কাজ ব্যবস্থার সীমারেখা দিয়ে ব্যবস্থার বাইরে যাচ্ছে।

১.৫.২ তাপ : কাজের ন্যায় তাপও এক প্রকার শক্তি এবং তাপ কোনো ব্যবস্থার গুণ বা ধর্ম নয়। তাপ ব্যবস্থার সীমারেখা দিয়ে ব্যবস্থার মধ্যে প্রবেশ করতে পারে, অথবা ব্যবস্থা থেকে বের হয়েও যেতে পারে। তাপ ব্যবস্থার সীমারেখা দিয়ে ব্যবস্থার মধ্যে ঢুকবে, না ব্যবস্থা থেকে বের হয়ে যাবে তা ব্যবস্থা এবং পরিপার্শ্বের তাপমাত্রার মানের উপর নির্ভরশীল।

যদি তাপ সীমারেখা অতিক্রম করে ব্যবস্থার মধ্যে প্রবেশ করে এই তাপ প্রবাহকে ধনাত্মক (+ ve) বলা হয়, তাপ যদি ব্যবস্থার বাইরে যায় তবে তাকে ঋণাত্মক তাপ প্রবাহ (–ve) বলা হয়।

তাপের একক জুল (Joule), J. তাপ প্রক্রিয়ার উপর নির্ভরশীল। উল্লেখ্য যে, তাপ ও কাজ উভয়েই ব্যবস্থার সীমারেখা অতিক্রম করার সময় ব্যবস্থার উপর প্রভাব ফেলে এবং ব্যবস্থাকে এক অবস্থা থেকে অন্য অবস্থায় নিয়ে যায়।

১.৬ তাপগতিবিদ্যার 'শূন্য সূত্র' (Zeroth Law of Thermodynamics)

তাপগতিবিদ্যার প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্র আলোচনার আগে এই সূত্রটি সম্পর্কে ধারণা থাকা প্রয়োজন, এজন্য এ সূত্রকে তাপগতিবিদ্যার শূন্য সূত্র (Zeroth Law) বলা হয় অর্থাৎ প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্রের আগের সূত্র।

এই সূত্র অনুযায়ী যদি দুটি বস্তু অন্য একটি তৃতীয় বস্তুর সাথে আলাদা আলাদাভাবে তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকে তাহলে এই দুটি বস্তু পরস্পর তাপীয় সাম্যাবস্থায় থাকবে এবং তিনটি বস্তুই একই তাপমাত্রায় থাকবে (When two bodies are in thermal equilibrium with a third body, the two bodies are in thermal equilibrium with each other and all three bodies are said to be at the same temperature)।

এই সূত্রের অন্যতম গুরুত্বপূর্ণ দিক হলো তাপের সমতা। অর্থাৎ যদি দুটি ব্যবস্থা একই তাপমাত্রায় থাকে এবং একে অন্যের সাথে তাপীয় যোগসূত্রে আসে তাহলে তাদের তাপমাত্রা বা এ সংক্রান্ত কোনোকিছুর পরিবর্তন হবে না। এই সূত্রটির ফলেই তাপগতিবিদ্যার অন্যতম ধর্ম 'তাপমাত্রা' মাপা সম্ভব হয় এবং তাপমাত্রা মাপার জন্য যেসব যন্ত্র ব্যবহার হয় সেগুলো এই সূত্র অনুসারে কাজ করে। তাপমাত্রার স্কেল নির্ধারণেও এই সূত্রটি ব্যবহৃত হয়।

১.৭ তাপগতিবিদ্যার তৃতীয় সূত্র (Third Law of Thermodynamics)

এই সূত্রটি তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রে উল্লিখিত এনট্রপির মান নির্ধারণের ক্ষেত্রে প্রয়োজন হয়। যদি কোনো বিশুদ্ধ বস্তুর তাপমাত্রা ক্রমশই কমানো হয় তাহলে লক্ষ্য করা যায় যে সেই বস্তুর অণু পরমাণুর শক্তিও ক্রমশ কমে আসে। অবশেষে পরম শূন্য তাপমাত্রায় (absolute zero temperature) সকল শক্তির মানই শূন্য হয়। ম্যাক্সপ্লাঙ্ক এই বিষয়টি তাপগতিবিদ্যার তৃতীয় সূত্রে অন্তর্ভুক্ত করেন। এই সূত্র অনুযায়ী "তাপগতীয় সাম্যাবস্থায় যদি কোনো বিশুদ্ধ বস্তুর তাপমাত্রা পরম শূন্য তাপমাত্রায় গমন করে তাহলে সেই বস্তুর এনট্রপির মানও শূন্য অঙ্কের দিকে গমন করবে (The entropy of each pure substance in thermodynamic equilibrium approaches zero as the temperature of the substance approaches absolute zero)।

অর্থাৎ পরম শূন্য তাপমাত্রায় বস্তুর বিশৃঙ্খলতার মান শূন্য এবং যতই তাপমাত্রা বাড়তে থাকে ততই বস্তুর বিশৃঙ্খলার মানও বাড়তে থাকে।

দ্বিতীয় অধ্যায়

বিশুদ্ধ বস্তু

(Pure Substance)

এ অধ্যায়ে বিশুদ্ধ বস্তু (pure substance) সম্পর্কে সংক্ষেপে ধারণা দেয়া হয়েছে। বিভিন্ন সমীকরণ দিয়ে যে কোনো বস্তুর তাপগতীয় অবস্থা (state) নির্ণয় সম্ভব। যদি বস্তুটি মিশ্র হয় তাহলে অবস্থার পরিবর্তনের সময় আয়তন পরিবর্তন সম্পর্কিত (W = pdv) কাজ ছাড়াও ব্যবস্থায় আরো কয়েক ধরনের কাজ সম্পাদিত হতে পারে যেমন— তড়িৎ ও চুম্বক শক্তির দ্বারা কাজ এবং বিস্তৃতির জন্য কাজ ইত্যাদি।

এগুলোর মান নির্ণয় করা খুবই জটিল যার ফলে ব্যবস্থার তাপগতীয় অবস্থা নিরূপণ করা কঠিন হয়ে পড়ে। আবার এমন অনেক বস্তু আছে যা আপাত স্থির প্রক্রিয়ায় মাত্র একই ধরনের কাজ (W = pdv) সম্পাদন করে থাকে যার ফলে তাপগতীয় ব্যবস্থায় এর অবস্থা সম্পূর্ণভাবে নির্ণয় করা সহজ এবং এর জন্য দুটি গুণের প্রয়োজন হয়। এ ধরনের বস্তুকে বিশুদ্ধ বস্তু বলা হয় এবং বিভিন্ন পরীক্ষা ও নিরীক্ষার মাধ্যমে লক্ষ্য করা যায় যে যদি মাধ্যাকর্ষণ শক্তি (gravity, electrical এবং magnetic) ও গতিশক্তির প্রভাব উল্লেখযোগ্য না হয় তাহলে এগুলোকে উপেক্ষা করা যায় এবং দুটি গুণ জানলে ব্যবস্থার অবস্থা বা তৃতীয় গুণ জানা সম্ভব। উদাহরণস্বরূপ চাপ (P) এবং তাপমাত্রা (T) এমন দুটি গুণাবলি ইত্যাদি।

তাপগতিবিদ্যায় প্রক্রিয়া ও চক্রের আলোচনায় এ ধরনের বিশুদ্ধ বস্তু (pure substance) ব্যবহৃত হয়ে থাকে।

২.১ সংজ্ঞা ও ধারণা

যেসব বস্তু সব জায়গায় সমমাত্রায় থাকে এবং এর রাসায়নিক গঠনের পরিবর্তন হয় না এবং বস্তুটির তরল, কঠিন ও বায়বীয় সকল দশাতেই একটি রাসায়নিক গঠন থাকে, এ ধরনের বস্তুকে বিশুদ্ধ বস্তু বা নির্ভেজাল বস্তু (pure substance) বলা হয়।

উদাহরণস্বরূপ পানিকে নেয়া হয়, পানি বরফ অবস্থায় থাকুক বা তরল অবস্থায় থাকুক বা বাষ্পীয় অবস্থায় থাকুক বা তরল এবং বাষ্পের মিশ্রণে থাকুক না কেন পানির রাসায়নিক গঠনের কোনো পরিবর্তন হয় না। পানি একটি বিশুদ্ধ বস্তু।

বাতাস যা মূলত অক্সিজেন ও নাইট্রোজেনের মিশ্রণ, গ্যাসীয় অবস্থায় বাতাসকে বিশুদ্ধ বস্তু হিসেবে গণ্য করা হয়। উল্লেখ করা যেতে পারে যে তরল বাতাস বা বায়ুর মিশ্রণ বিশুদ্ধ নয় কারণ এ দুয়ের রাসায়নিক গঠন ভিন্ন। তেমনি তেল ও পানির মিশ্রণও বিশুদ্ধ বস্তু নয়।

মনে রাখতে হবে যে এই বিশুদ্ধ বস্তুকে অনেক সময় বিশুদ্ধ সংনমনযোগ্য বস্তু (simple compressible substance) বলা হয়। এই বস্তু আপাত স্থির প্রক্রিয়ায় শুধু একই ধরনের কাজ অর্থাৎ W = pdv সম্পাদন করে থাকে।

BANGDOC Library

২.২ বিশুদ্ধ বস্তুর গুণাবলি

আলোচনার প্রথমেই বলা দরকার যে দু'ধরনের বিশুদ্ধ বস্তু আছে। প্রথম ধরনের বস্তু তরল অবস্থা থেকে কঠিন অবস্থায় গেলে এর আয়তন বৃদ্ধি পায়, যেমন পানি। দ্বিতীয় ধরনের বস্তু তরল অবস্থা থেকে কঠিন অবস্থায় গেলে এর আয়তন কমে আসে যেমন কার্বন–ডাই–অক্সাইড (CO_2)।

এ বস্তুদ্বয়ের চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রার সম্পর্ক চাপ, আয়তন ও তাপমাত্রার (P–V–T) চিত্রে (চিত্র ২.১ ও ২.৩) দেখানো হলো।

উল্লেখ করা যেতে পারে যে তাপগতিবিদ্যায় মূলত ছয়টি ধর্ম, যেমন চাপ (P), আয়তন (V), তাপমাত্রা (T), অন্তস্থ শক্তি (u), এনথালপি (h) এবং এনট্রপি (s) নিয়েই আলোচনা করা হয়। এর মধ্যে ৩টি ধর্ম যেমন P–V–T, সরাসরি মাপা যায় এবং u, h ও s নির্ণয় করা যায়।

২.১ ও ২.৩ চিত্রে লক্ষ্য করা যায় যে, কোনো বস্তুকে কঠিন, তরল, বাষ্পীয় বা গ্যাসীয় দশায় থাকতে হলে P–V–T এর সম্পর্ক মানতে হবে। আরো লক্ষণীয় যে, কয়েকটি দশা যেমন, তরল, বাষ্প ইত্যাদি সহঅবস্থান করতে পারে এবং তিনটি দশা ও (কঠিন, তরল ও বাষ্পীয়) সহঅবস্থান করতে পারে এবং এটি একটি রেখা বরাবর হয়। এই রেখাকে ট্রিপল লাইন (triple line) বলে।

২.৩ বিশুদ্ধ বস্তুর P–V–T সম্পর্ক

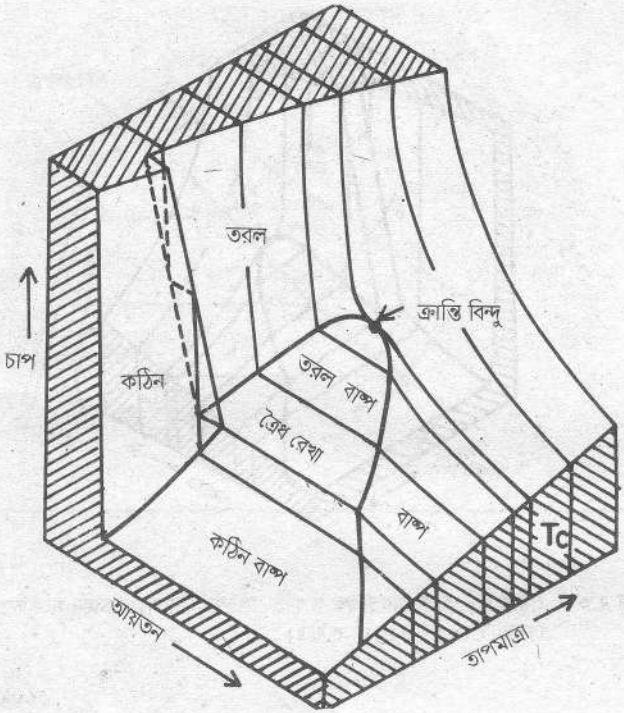
বিশুদ্ধ বস্তুর P–V–T চিত্রটি বুঝা একটু কঠিন। যদি দুটি করে ধর্ম নেয়া হয় যেমন P–T, P–V ইত্যাদি তা হলে আলোচনা সহজ হয়।

২.২ চিত্রে যেসব বস্তু কঠিন অবস্থায় প্রসারিত হয় তার P–T সম্পর্ক দেখানো হলো এবং ২.৪ চিত্রে যেসব বস্তু কঠিন অবস্থায় সংকুচিত হয় তার P–T সম্পর্ক দেখানো হলো।

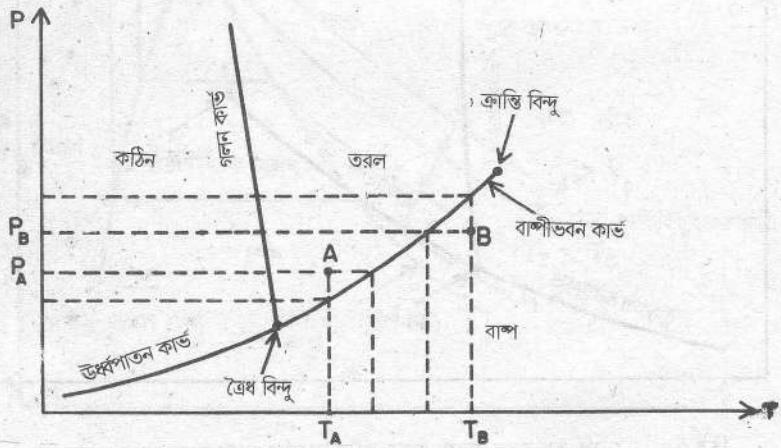
এ দুটি চিত্রে লক্ষ্য করা যায় যে তিনটি রেখা কঠিন, তরল ও বাষ্পীয় দশাকে আলাদা করে দিয়েছে। এই তিনটি রেখা যে জায়গায় যোগ হয় তাকে ত্রৈধ বিন্দু (triple point) বলা হয়।

অন্য চিত্রগুলোতে (চিত্র ২.৫ থেকে ২.৯) এই বস্তুর অন্যান্য ধর্মের সাথে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। এই চিত্রগুলোতে বিশেষভাবে লক্ষণীয় বিষয় এই যে বিশুদ্ধ বস্তুর অবস্থা দুটি অনির্ভরশীল গুণ দিয়ে নির্দিষ্ট করা যায়।

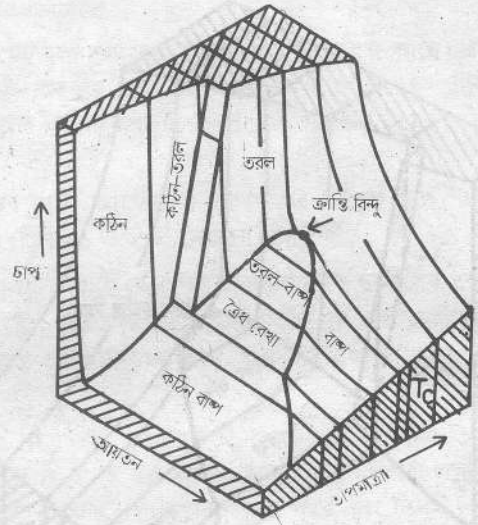
চিত্রগুলোতে লক্ষ্য করা যায় যে, চিত্রে একদিকে শুষ্ক সংপৃক্ত বাষ্পের রেখা ও অন্যদিকে সংপৃক্ত তরল অবস্থার রেখা রয়েছে এবং এ দুটি রেখা একটি বিন্দুতে মিলিত হয়। একে ক্রান্তি বিন্দু (critical point) বলা হয়। এ বিন্দুতে তরল ও বাষ্পীয় অবস্থার আপেক্ষিক আয়তন একই। এই বিন্দুর গুরুত্ব অনেক। এই বিন্দু দিয়ে যে সমোষ্ণ তাপরেখা যায় (চিত্র ২.৬) তাকে সীমান্তিক উষ্ণতা বা ক্রান্তি সমোষ্ণ রেখা বলা হয়। এই তাপমাত্রার উপরে কোনো তাপমাত্রাতেই বস্তুকে তরলীভূত করা সম্ভব হয় না।



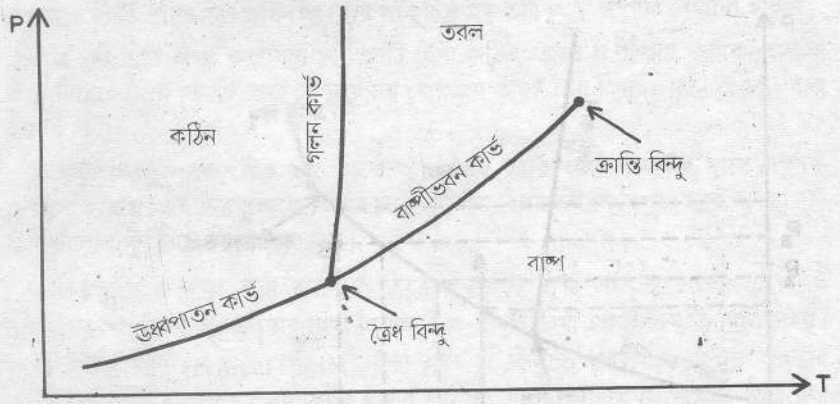
চিত্র ২.১ : যেসব বস্তু তরল অবস্থা থেকে কঠিন অবস্থায় গেলে আয়তনে বৃদ্ধি পায় (যেমন পানি) তার P–V–T চিত্র।



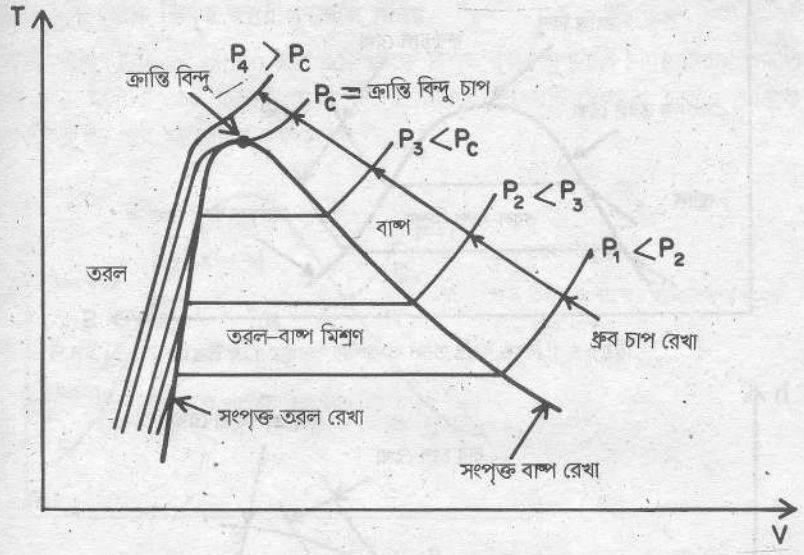
চিত্র ২.২ : যেসব বস্তু তরল অবস্থা থেকে কঠিন অবস্থায় গেলে আয়তনে বৃদ্ধি পায় (যেমন পানি) তার P–T চিত্র।



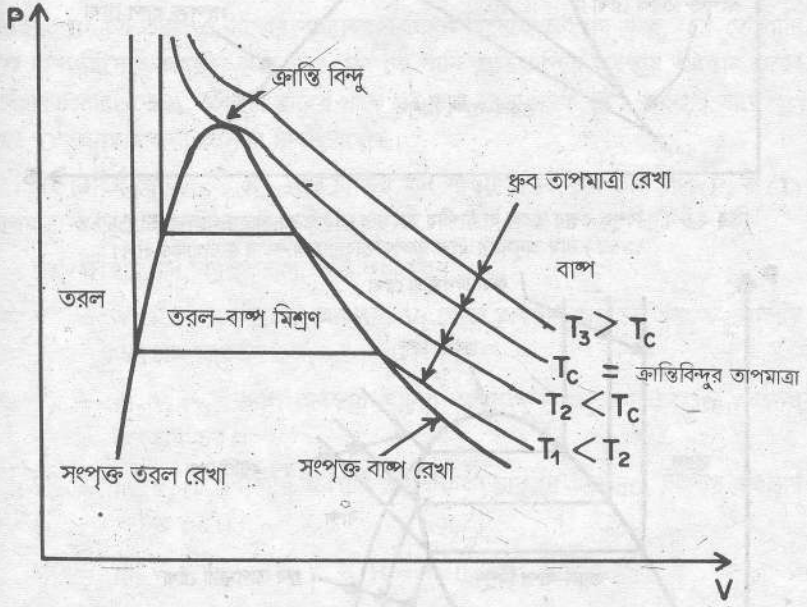
চিত্র ২.৩ : যেসব বস্তু তরল অবস্থা থেকে কঠিন অবস্থায় গেলে আয়তনে সংকুচিত হয় (যেমন CO_2) তার P–V–T চিত্র।



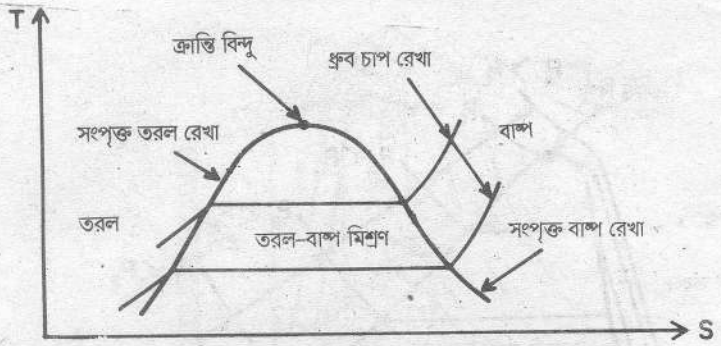
চিত্র ২.৪ : যেসব বস্তু তরল অবস্থা থেকে কঠিন অবস্থায় গেলে আয়তনে সংকুচিত হয় (যেমন CO_2) তার P–T চিত্র।



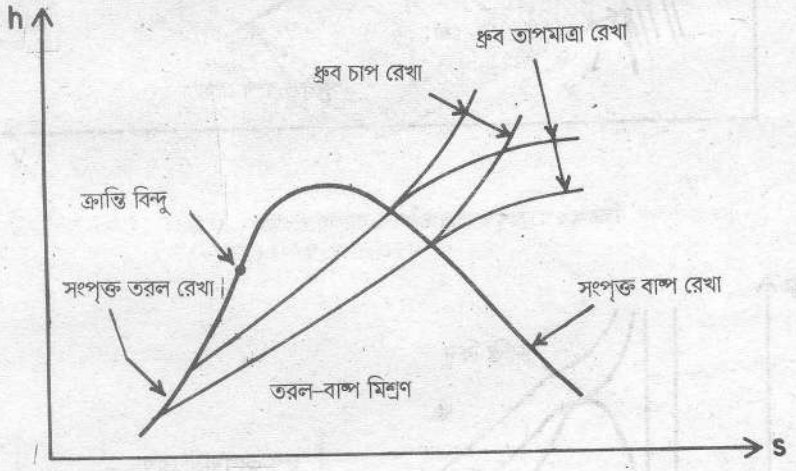
চিত্র ২.৫ : বিশুদ্ধ বস্তুর তরল ও বাষ্পীয় অবস্থার T–V চিত্র।



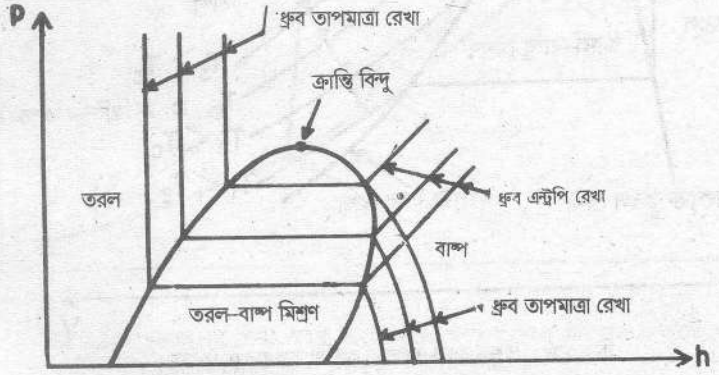
চিত্র ২.৬ : বিশুদ্ধ বস্তুর তরল বা বাষ্পীয় অবস্থার P–V চিত্র।



চিত্র ২.৭ : বিশুদ্ধ বস্তুর তরল বা বাষ্পীয় অবস্থার T–S চিত্র।



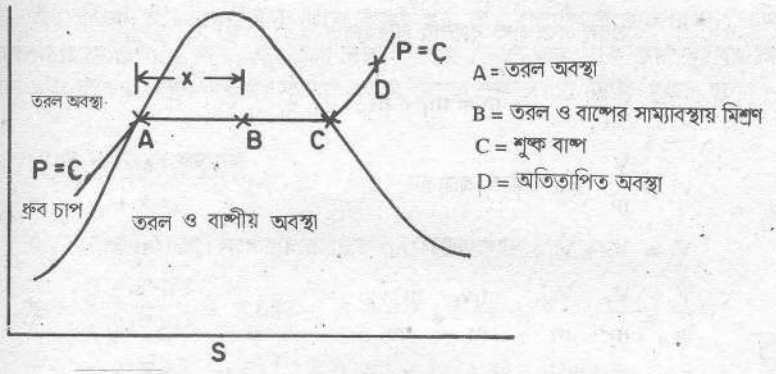
চিত্র ২.৮ : বিশুদ্ধ বস্তুর তরল বা বাষ্পীয় অবস্থার h–s চিত্র। রিচার্ড মলিয়ারের (১৮৬৩–১৯৩৫) নাম অনুসারে একে তাপগতিবিদ্যায় মলিয়ার ডায়াগ্রামও বলে।



চিত্র ২.৯ : বিশুদ্ধ বস্তুর তরল ও বাষ্পীয় অবস্থার P–h চিত্র।

২.৪ সারণি থেকে বিশুদ্ধ বস্তুর গুণাবলি নির্ণয়

বাষ্পের সারণি (steam table) এবং ছবি থেকে বিশুদ্ধ বস্তুর গুণাবলি নির্ণয় করার পদ্ধতি নিচে দেয়া হলো। ২.১০ চিত্রের (T–S চিত্র) সাহায্যে বিষয়টি দেখানো হলো। পানিকে কার্যকর ফ্লুইড ধরে আলোচনা করা হলো।



চিত্র ২.১০ : T–S চিত্র।

পানি কয়েকটি অবস্থায় বিরাজ করতে পারে। 'A' অবস্থায় পানি সবটুকুই তরল অবস্থা, 'B' তে তরল ও বাষ্পের সাম্যাবস্থার মিশ্রণ হিসেবে অবস্থান করে, 'C' তে পানি শুষ্ক বাষ্প হিসেবে অবস্থান করে এবং 'D' তে পানি অতিতাপিত অবস্থায় অবস্থান করে। সাধারণত সারণিতে A অবস্থার মানের সাথে 'f' কথা লেখা থাকে, 'C' অবস্থার সাথে 'g' এবং 'D' অবস্থার জন্য আলাদা সারণি রয়েছে।

এই টেবিল থেকে u, v, h, s–এর বিভিন্ন মান পাওয়া সম্ভব, এর জন্য চাপ (P) বা (T) তাপমাত্রা বা উভয়ই জানা প্রয়োজন হয়।

'B' অবস্থার মান নিম্নরূপভাবে নির্ণয় করা হয়।

$V = V_f + V_g$ = মিশ্রণের আয়তন, V_f তরল অবস্থার আয়তন এবং V_g বাষ্পীয় অবস্থার আয়তন।

$V_f = m_f v_f$ (v_f, তরল অবস্থায় পানির আপেক্ষিক আয়তন এবং m_f, তরল অবস্থার ভর।)

$V_g = m_g v_g$ (v_g, বাষ্পীয় অবস্থার আপেক্ষিক আয়তন এবং m_g, বাষ্পীয় অবস্থায় পানির ভর।)

$V = m_f v_f + m_g v_g$ $\qquad H = m_f h_f + m_g h_g$

$U = m_f u_f + m_g u_g$ $\qquad s = m_f s_f + m_g s_g$

'B' অবস্থার মান জানতে হলে আর একটি বিষয় জানা দরকার, তাকে শুষ্কতা (quality) 'X' বলা হয়।

$$X = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$

$$= \frac{\text{শুষ্ক বাষ্পের পরিমাণ}}{\text{তরল এবং শুষ্ক বাষ্পের পরিমাণ}}$$

$$= \frac{m_g}{m}, \qquad m = m_f + m_g$$

$$v = \frac{V}{m}, \text{ আপেক্ষিক আয়তন}$$

$$V = V_f + V_g, \text{ সবগুলোকে 'm' দ্বারা ভাগ করলে}$$

$$\frac{V}{m} = \frac{V_f}{m} + \frac{V_g}{m} = \frac{m_f v_f}{m} + \frac{m_g v_g}{m}$$

$$v = \frac{(m - m_g)\, v_f}{m} + X v_g$$

$$= (1 - X)\, v_f + X v_g$$

$$= v_f + X\,(v_g - v_f)$$

$$= v_f + X\,(v_{fg})$$

এমনিভাবে নিচের আপেক্ষিক গুণাবলির সমীকরণগুলো লেখা যায়।

$$u = u_f + X\,(u_g - u_f) = u_f + X\, u_{fg}$$

$$h = h_f + X\,(h_g - h_f) = h_f + X\, h_{fg}$$

$$s = s_f + X\,(s_g - s_f) = s_f + X\, s_{fg}$$

সমস্যা-১

একটি বদ্ধ পাত্রে জলীয় বাষ্পের তাপমাত্রা 150°C এবং আপেক্ষিক আয়তন 0.27 m^3/kg। বাষ্পের নিচের গুণাবলি নির্ধারণ কর।

(ক) v_f, v_g, v_{fg}

(খ) X, শুষ্কতা

(গ) h, এনথালপি

(ঘ) s, এনট্রপি

(ঙ) u, অন্তস্থ শক্তি

সমাধান : বাষ্প সারণি থেকে T = 150°C তাপমাত্রায় নিচের তথ্যগুলো পাওয়া যায়।

V_f	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	S_f	S_{fg}	S_g	u_f	u_{fg}	u_g
0.001091	0.3928	632.2	2114.3	2746.5	1.8418	4.996	6.8379	631.68	1927.9	2559.5

আপেক্ষিক আয়তনের মান থেকে লক্ষ্য করা যায় যে, পাত্রে বাষ্পের আপেক্ষিক আয়তন 0.27 m^3/kg, যা v_f এর চেয়ে বেশি, আবার v_g এর মান থেকে কম, সুতরাং পাত্রে পানি এবং বাষ্পের মিশ্রণ রয়েছে। সুতরাং প্রথমে বাষ্পের শুষ্কতা 'X' নির্ণয় করতে হবে।

পূর্বের সমীকরণ অনুযায়ী

$$v = v_f + x\, v_{fg}$$

$$0.27 = 0.001091 + x\,(0.3928 - 0.001091)$$

$$\therefore\ X = \frac{0.268909}{.391709} = 0.687$$

$$h = h_f + X\, h_{fg} = 632.2 + 0.687 \times 2114.3 = 2084.7$$

একইভাবে s এবং u এর মান নির্ণয় করা যায়।

$$s = s_f + X\, s_{fg} = 1.8418 + 0.687 \times 4.996 = 5.274$$

$$u = u_f + X\, u_{fg} = 631.68 + 0.687 \times 1927.9 = 1955.5$$

সমস্যা-২

একটি বদ্ধ পাত্রে জলীয় বাষ্প 500 kPa চাপে এবং 300°C তাপমাত্রায় রয়েছে। বাষ্পের আপেক্ষিক এনথালপি নির্ণয় কর।

সমাধান : পানির গুণাবলির সারণি পর্যালোচনা করলে দেখা যায় এ 500 kPa চাপে শুষ্ক বাষ্পের তাপমাত্রা 151.86°C কিন্তু পাত্রে বাষ্পের তাপমাত্রা 300°C, সুতরাং বাষ্পটি অতিতাপিত। অতিতাপিত বাষ্পের জন্য আর একটি সারণি ব্যবহার করতে হয়। অতিতাপিত বাষ্প সারণি থেকে দেখা যায় যে, আপেক্ষিক এনথালপি, h = 3064.2 kJ/kg।

তৃতীয় অধ্যায়

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র

(First law of Thermodynamics)

৩.১ তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র কাজ ও তাপের মধ্যকার সম্পর্ক বিবৃত করে।

প্রথম সূত্র অনুযায়ী যদি কোনো বদ্ধ ব্যবস্থা একটি চক্র (cycle) সম্পাদন করে তাহলে এই ব্যবস্থা দ্বারা সম্পাদিত নিট কাজের পরিমাণ এবং পরিপার্শ্বের সাথে এই ব্যবস্থার নিট তাপ বিনিময় সমানুপাতিক (proportional) (For any cycle of a closed system, the net heat transfer is equal to the net work)

অর্থাৎ $$\oint \delta Q \; \alpha \oint \delta W \qquad (৩.১)$$

$\int$ এই চিহ্ন দ্বারা চক্রের নিট পরিমাণ বুঝায়।

α এই চিহ্ন দ্বারা সমানুপাতিক বোঝায়।

৩.১ সমীকরণটি নিম্নরূপে লেখা যায় :

$$J \oint \delta Q = \oint \delta W \qquad (৩.২)$$

এখানে J-কে কাজ ও তাপের ধ্রুবক এবং তাপের যান্ত্রিক সমমানতা বলা যায়।

যদি কাজ ও তাপের একই একক হয় তাহলে $J = 1$ হবে এবং সেক্ষেত্রে ৩.২ সমীকরণটি

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \qquad (৩.৩)$$

এভাবে লেখা যায়।

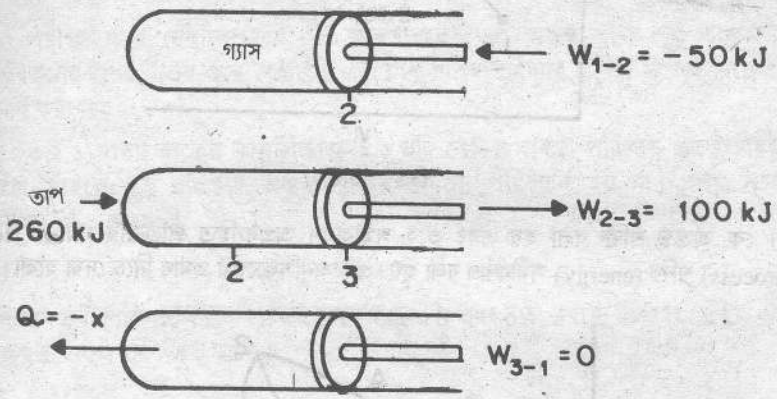
উল্লেখ্য যে, প্রথম সূত্রের কোনো প্রমাণ নেই, তাপগতিবিদ্যার সকল প্রক্রিয়াই এই সূত্র মেনে চলে এবং প্রথম সূত্রকে ভুল প্রমাণিত করে না, তাই এটিকে একটি প্রাকৃতিক নিয়মও বলা চলে।

নিচে উদাহরণের সাহায্যে কাজ ও তাপের সম্পর্ক বুঝানো হলো।

উদাহরণ ৩.১ : একটি সিলিন্ডারের মধ্যে একটি গ্যাস রয়েছে যার একদিক পিস্টন দ্বারা আবদ্ধ অন্যদিক বদ্ধ। এই ব্যবস্থাটি একটি চক্র সম্পন্ন করে, ১–২ প্রক্রিয়ায় পিস্টনটি

আবদ্ধ গ্যাসের উপর –50 kJ কাজ করে এবং কোনো তাপ প্রবাহ হয় না। ২–৩ প্রক্রিয়ায় সিলিন্ডারের ভিতরে 260 kJ তাপ প্রবাহ হয় এবং পিস্টন পরিপার্শ্বের উপর 100 kJ কাজ করে। 3–1 প্রক্রিয়ায় পিস্টন স্থির থাকে এবং আবদ্ধ গ্যাসকে ঠাণ্ডা করে প্রথম অবস্থায় ফিরিয়ে আনা হয়। ব্যবস্থাটি হতে 3–1 প্রক্রিয়ায় কি পরিমাণ তাপ বের হয়েছে।

সমাধান :



চিত্র ৩.১ : উদাহরণ ৩.১।

মনে করি 3–1 প্রক্রিয়ার 'X' পরিমাণ তাপ বের হয়েছে।

প্রথম সূত্র অনুযায়ী

$$\oint \delta W = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-1}$$

$$= -50 + 100 + 0$$

$$\oint \delta Q = Q_{1-2} + Q_{2-3} + Q_{3-1}$$

$$= 0 + 260 + X$$

প্রথম সূত্র অনুযায়ী

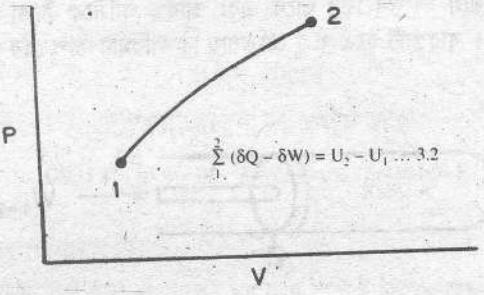
$$\oint \delta W = \oint \delta Q \qquad \therefore\ -50 + 100 + 0 = 0 + 260 + X$$

$$\therefore\ X = -310 + 100 = -210 \text{ kJ}$$

৩.২ অন্তস্থ শক্তি : প্রথম সূত্রের অনুসিদ্ধান্ত-১

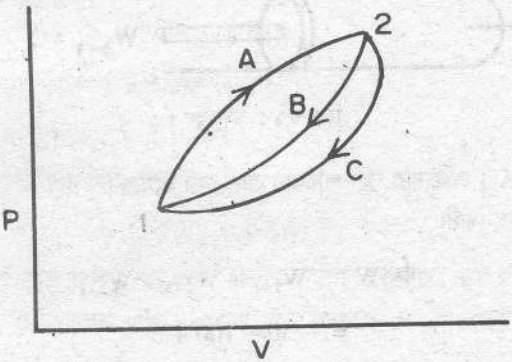
যদি কোনো বদ্ধ ব্যবস্থা একটি প্রক্রিয়ার মাধ্যমে এক অবস্থা থেকে অন্য অবস্থায় পরিবর্তিত হয় তাহলে এই প্রক্রিয়ায় তাপ সরবরাহ ও কাজের বিয়োগফল এই ব্যবস্থার একটি গুণ বা

ধর্ম এবং এই ধর্মকে অন্তস্থ শক্তি (internal energy) বলা হয়। এই ধর্মকে নিচে দেখানো হলো।



চিত্র : ৩.২

U কে অন্তস্থ শক্তি বলা হয় এবং ৩.২ সমীকরণ অপ্রবাহিত প্রক্রিয়ার (Non flow process) শক্তি (energy) সমীকরণ বলা হয়। এই অনুসিদ্ধান্তের প্রমাণ নিচে দেয়া হলো।



চিত্র : ৩.৩

মনে করি একটি ব্যবস্থা একটি চক্রকে দুইভাবে (1–A–2–B–1 এবং 1–A–2–C–1) সম্পন্ন করতে পারে। প্রথম সূত্র অনুযায়ী

$$\int (\delta Q - \delta W) = 0$$

চক্র 1–A–2–B–1 তে $\int_{1-A}^{2} ((\delta Q - \delta W) + \int_{2-B}^{1} ((\delta Q - \delta W) = 0$

চক্র 1–A–2–C–1 তে $\int_{1-A}^{2} ((\delta Q - \delta W) + \int_{2-C}^{1} ((\delta Q - \delta W) = 0$

সুতরাং $\int_{2-B}^{1} ((\delta Q - \delta W) = \int_{2-C}^{1} ((\delta Q - \delta W)$ যেহেতু প্রথম সূত্র অনুযায়ী

এ দুটির মান সমান হবে সুতরাং $\int_{2-B}^{1} ((\delta Q - \delta W) = \Delta U$ এবং এটি একটি ধর্ম।

পরীক্ষা করে দেখানো যায় যে, আদর্শ গ্যাস এর অন্তস্থ শক্তি শুধু তাপমাত্রার পরিবর্তনের উপর নির্ভর করে, অর্থাৎ $u = f(T)$। তাপগতিবিদ্যার বিভিন্ন সম্পর্ক দিয়ে এটি প্রমাণ করা যায়।

৩.২.১ প্রথম সূত্রের অনুসিদ্ধান্ত-২ : যদি কোনো ব্যবস্থা পরিপার্শ্ব থেকে বিচ্ছিন্ন থাকে তাহলে এই ব্যবস্থার অন্তস্থ শক্তির কোনো পরিবর্তন হয় না। প্রথম সূত্রের অনুসিদ্ধান্ত-১ অনুযায়ী

$$\sum_1^2 (\delta Q - \delta W) = U_2 - U_1$$

যদি ব্যবস্থাটি পরিপার্শ্ব থেকে বিচ্ছিন্ন থাকে $\delta Q = 0$ এবং $\delta W = 0$ সুতরাং $U_2 = U_1$ এবং অন্তস্থ শক্তি অপরিবর্তিত থাকে।

৩.৩ শক্তি প্রয়োগ ব্যতীত কোনো যন্ত্রের অনন্ত কালব্যাপী চালু থাকা সম্ভব নয় (Perpetual Motion Machine of the First Kind is not Possible)

এই অনুসিদ্ধান্ত অনুযায়ী কোনো শক্তি প্রয়োগ ব্যতিরেকে কোনো যন্ত্র অনন্তকালব্যাপী চালু অবস্থায় থাকা এবং এই যন্ত্র থেকে অনন্তকাল ধরে কাজ পাওয়া সম্ভব নয়। প্রথম সূত্র অনুযায়ী কাজ পেতে হলে শক্তি (তাপ) প্রয়োগ প্রয়োজন। তাই বিনা তাপ প্রয়োগে অনন্তকালব্যাপী চালু থেকে চক্রের পরিপার্শ্বের উপর কাজ সম্পাদন করা সম্ভব নয় (Perpetual motion machine of the first kind is not possible)।

নিচে কয়েকটি প্রক্রিয়ায় প্রথম সূত্রের প্রয়োগ দেখানো হয়েছে। প্রথমে বদ্ধ ব্যবস্থার (closed system) এবং পরে উন্মুক্ত ব্যবস্থা (open system) বা প্রবাহিত প্রক্রিয়ায় (flow process) প্রথম সূত্রের প্রয়োগ দেখানো হবে।

৩.৪ বদ্ধ ব্যবস্থায় প্রথম সূত্রের প্রয়োগ

৩.৪.১ ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া (constant volume process) : এই প্রক্রিয়ায় আয়তনের কোনো পরিবর্তন হয় না। প্রথম সূত্রের অনুসিদ্ধান্ত অনুযায়ী $\sum_1^2 (\delta Q - \delta W) = U_2 - U_1$

যেহেতু ধ্রুব আয়তন তাই $\delta W = 0$

(তাপগতিবিদ্যার আলোচনায় ধ্রুব আয়তন ব্যবস্থায় সম্পাদিত কাজকে শূন্য ধরা হয়) তাই $\sum_1^2 \delta Q = U_2 - U_1$ সমস্ত তাপ অন্তস্থ শক্তিতে রূপান্তরিত হয়।

বি:দ্র: যদি অল্প তাপমাত্রার ব্যবধানে তাপ প্রয়োগ করা হয় তাহলে ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী (reversible) হবে।

৩.৪.২ সমচাপ বা ধ্রুবচাপ প্রক্রিয়া (Constant pressure process) : এই প্রক্রিয়ায় চাপের কোনো পরিবর্তন হয় না।

প্রথম সূত্র অনুযায়ী $\sum_1^2 (\delta Q - \delta W) = U_2 - U_1$

যেহেতু সমচাপ $\delta W = P (V_2 - V_1)$

সুতরাং $\delta Q - P (V_2 - V_1) = U_2 - U_1$

$$\delta Q = (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = H_2 - H_1$$

যেখানে $U + PV = H$, H কে এনথালপি বলা হয়। যদি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া হয় তাহলে $dQ = d(U + PV) = dH$ লেখা যায়। এনথালপি ব্যবস্থার একটি ধর্ম, h কে (specific enthalpy) আপেক্ষিক এনথালপি বলা হয়।

৩.৪.৩. সমোষ্ণ প্রক্রিয়া (Isothermal process) : এই প্রক্রিয়ায় ব্যবস্থার তাপমাত্রা অপরিবর্তিত থাকে বা ধ্রুব থাকে। এই প্রক্রিয়ায় ব্যবস্থাটি পরিপার্শ্বের সাথে তাপ বিনিময় করে ব্যবস্থার তাপমাত্রা ধ্রুব রাখে।

যেহেতু অন্তস্থ শক্তি শুধু তাপমাত্রার পরিবর্তনের উপর নির্ভরশীল, তাই সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় অন্তস্থ শক্তির কোনো পরিবর্তন হয় না। $U_2 - U_1 = 0$ এবং $dQ = dW$ অর্থাৎ নিট তাপ সম্পাদিত কাজের সমান।

এই প্রক্রিয়া বয়েলের সূত্র মেনে চলে, সুতরাং $PV = c =$ ধ্রুব। এই প্রক্রিয়ায় কাজের পরিমাণ নিম্নরূপে নির্ণয় করা হয়।

$$W = \int_1^2 pdv = p_1 v_1 \int_1^2 \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \log_e \frac{v_2}{v_1}$$

৩.৪.৪ রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়া (Adiabatic process) : এই প্রক্রিয়ায় কোনো ব্যবস্থা এক অবস্থা হতে অন্য অবস্থায় পরিবর্তনের সময় ব্যবস্থা হতে তাপ সীমারেখা অতিক্রম করে পরিপার্শ্বে যেতে পারে না বা পরিপার্শ্ব হতে তাপ সীমারেখা অতিক্রম করে ব্যবস্থার ভিতরে প্রবেশ করতে পারে না। প্রথম সূত্রের অনুসিদ্ধান্ত অনুযায়ী

$$dQ - dW = U_2 - U_1$$

এই প্রক্রিয়ায় $dQ = 0$ সুতরাং $dW = U_1 - U_2$

অর্থাৎ কাজ অন্তস্থ শক্তিতে রূপান্তরিত হয় অথবা অন্তস্থ শক্তি ব্যয় করে ব্যবস্থা পরিপার্শ্বের উপর কাজ করে।

৩.৪.৫ পলিট্রপিক প্রক্রিয়া (Polytropic process) : এই প্রক্রিয়া উপরিউক্ত কোনো বিশেষ প্রক্রিয়া মেনে চলে না। অনেক প্রক্রিয়া আছে যা সরাসরি ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া (constant volume) অথবা ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়া (constant pressure) হিসেবে গণ্য করা যায় না। আবার P এবং V এর সম্পর্ক জানা না থাকলে $W = \int pdv$ নির্ণয় করা সম্ভব হয় না। লক্ষ্য করা যায় যে বেশিরভাগ ক্ষেত্রেই যে কোনো প্রক্রিয়ায় P এবং V এর সম্পর্ক PV^n = ধ্রুব = constant = c সমীকরণ হিসেবে লেখা যায়। যে কোনো বিশেষ প্রক্রিয়ার জন্য n এর মান ধ্রুব। $PV^n = c$ এই সম্পর্ককে পলিট্রপিক (অর্থাৎ বহুমুখী) বলা হয় এবং প্রক্রিয়াটিকে পলিট্রপিক প্রক্রিয়া বলা হয়। এই প্রক্রিয়ায় কাজের পরিমাণ নিম্নরূপে নির্ণয় করা যায়।

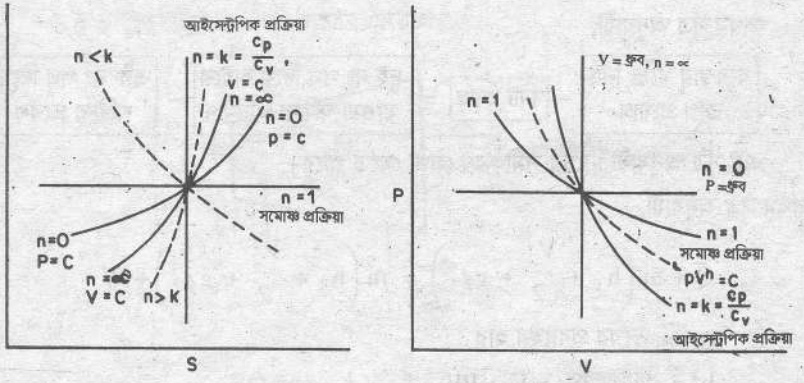
$$PV^n = c$$

$$W = \int_1^2 PdV = P_1 V_1^n \int_1^2 \frac{dV}{V^n} \qquad \left[P = \frac{P_1 V_1^n}{V^n}\right]$$

$$= \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1 - n} = \frac{P_1V_1 - P_2V_2}{n - 1}$$

এবং প্রথম সূত্র অনুযায়ী $Q - \frac{(P_2V_2 - P_1V_1)}{1 - n} = U_2 - U_1$

চিত্রে n এর মান অনুযায়ী প্রক্রিয়া দেখানো হলো।

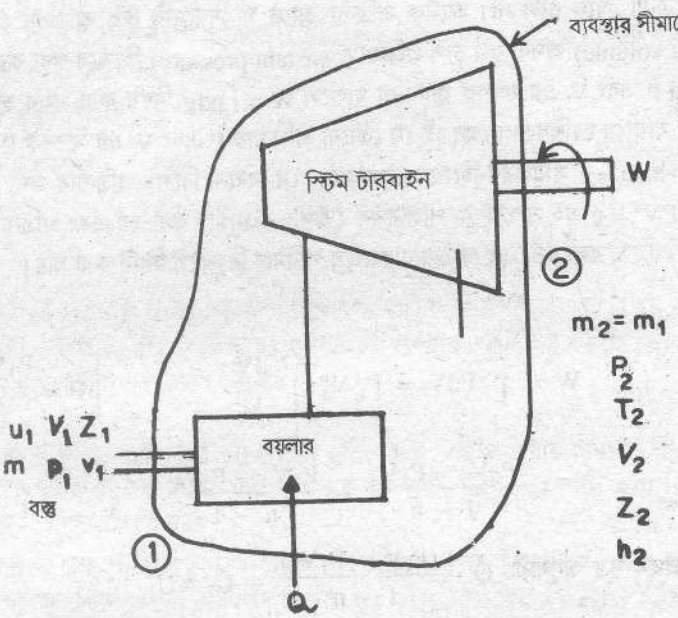


চিত্র ৩.৪ : পলিট্রপিক প্রক্রিয়া।

৩.৫ প্রবাহিত ও উন্মুক্ত অবস্থায় প্রথম সূত্রের প্রয়োগ

এখানে অপরিবর্তিত প্রবাহের (steady flow process) জন্য প্রথম সূত্রের প্রয়োগ দেখানো হবে।

নিচে অপরিবর্তিত প্রবাহ দেখানো হলো।



চিত্র ৩.৫ : উন্মুক্ত ব্যবস্থা।

প্রথম সূত্র অনুযায়ী,

ব্যবস্থার মধ্যে নিট তাপ প্রয়োগ	−	নিট কাজ	=	দুই নং পথ দিয়ে বাইরে যাওয়া শক্তির পরিমাণ	−	এক নং পথ দিয়ে শক্তির প্রবেশ

এই সূত্র অনুযায়ী নিচের সমীকরণ লেখা যেতে পারে।

প্রথম সূত্র অনুযায়ী,

$$Q + m\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1\right) = m\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2\right) + W$$

m = ভরের প্রবাহের হার

h = এনথালপি $= U + PV$

V = গতিবেগ

z = উচ্চতা

Q = তাপ

W = কাজ

অপরিবর্তিত প্রবাহে ব্যবস্থার যে কোনো স্থানের সকল ধর্ম সময়ের সাপেক্ষে ধ্রুব থাকে এবং ব্যবস্থার মধ্যে কোনো শক্তি জমা হয় না এবং যে পরিমাণ বস্তু ব্যবস্থার মধ্যে প্রবেশ করে তা আবার ব্যবস্থা থেকে বের হয়ে যায়।

$h_1 = u_1 + p_1v_1$ কে এনথালপি বলা হয় এবং p_1v_1 কে প্রবাহের কাজ (flow work) বলা হয়। U অন্তস্থ শক্তি, V বস্তুর গতি, Z উচ্চতার শক্তি, Q পরিমাণ তাপ বস্তুর মধ্যে প্রবেশ করে এবং W পরিমাণ কাজ পরিবেশের উপর সম্পন্ন হয়।

নিচে উপরিউক্ত সমীকরণের কিছু প্রয়োগ দেখানো হলো।

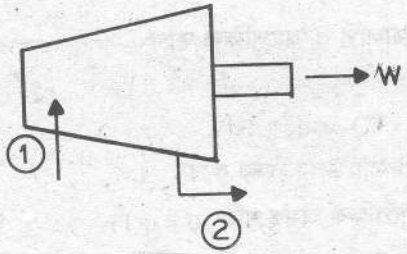
৩.৫.১ বয়লারে ও কনডেনসারে প্রথম সূত্রের প্রয়োগ : বয়লারে তাপ প্রয়োগ করে বাষ্প উৎপাদন করা হয় এবং কনডেনসারে বাষ্পকে শীতল করে তরল করা হয়। উভয় ক্ষেত্রেই

$W = 0, Z_1 = Z_2$ ধরা হয় ; এবং $V_1 = V_2$ ধরা যায়।

বয়লারে এবং কনডেনসারে প্রথম সূত্র নিম্নরূপ দাঁড়ায় :

বয়লারে তাপ প্রয়োগ করা হয় এবং $W = 0$ সুতরাং বয়লার $Q = (h_2 - h_1)$ কনডেনসারে তাপ ব্যবস্থা থেকে নিষ্কাশন করা হয়, $Q = -ve$ এবং প্রথম সূত্র অনুযায়ী কনডেনসার $Q = -(h_2 - h_1)$

৩.৫.২ টারবাইন এ প্রথম সূত্রের প্রয়োগ

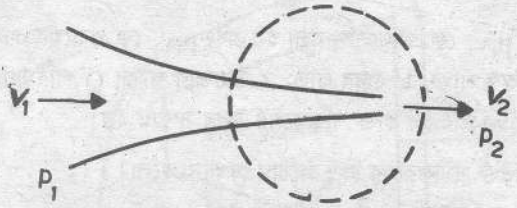


$Q = 0$ [∵ টারবাইনে তাপ বিনিময় খুবই কম]

$Z_2 = Z_1$
$V_2 = V_1$ } ধরা যেতে পারে।

এবং $W = (h_1 - h_2)$

৩.৫.৩ নজল এ প্রথম সূত্রের প্রয়োগ : নজলে চাপের ব্যয়ে ফ্লুইডের গতিবেগ বাড়ানো হয়।



নজলে $W = 0$

$Q = 0$

তাই $\frac{1}{2} \times \left(V_2^2 - V_1^2\right) + (h_2 - h_1) + g\,(z_2 - z_1) = 0$

৩.৫.৪ থ্রটলিং প্রক্রিয়ায় (throttling process) প্রথম সূত্র। এই প্রক্রিয়ায় ফ্লুইডের গতিপথে ভাল্‌ভ লাগিয়ে খুব বেশি পরিমাণ চাপ কমানো হয়।

এই প্রক্রিয়ায়

$Q = 0$, $W = 0$, $Z_2 - Z_1$ এবং $V_2 = V_1$ ধরা হয়

সুতরাং $h_2 = h_1$

এনথালপি প্রথম ও শেষে একই রকম থাকে।

৩.৬ অন্তস্থ শক্তি, এনথালপি ও আপেক্ষিক তাপ

প্রথম সূত্র অনুযায়ী

$$dQ = du + PdV$$

u অন্তস্থ শক্তি শুধু তাপমাত্রার উপর নির্ভর করে

আদর্শ গ্যাস এর জন্য আপেক্ষিক অন্তস্থ শক্তি $u = u(T)$

আবার প্রথম সূত্র অনুযায়ী প্রবাহিত প্রক্রিয়ায় আপেক্ষিক এনথালপি

$$h = u + pv$$

$$PV = RT$$

$$\therefore \quad h = u + RT = h\,(T)$$

অর্থাৎ এনথালপিও শুধু তাপমাত্রার উপর নির্ভরশীল। আদর্শ গ্যাস এর জন্য দুই ধরনের আপেক্ষিক তাপ রয়েছে। একটিকে ধ্রুব আয়তন আপেক্ষিক তাপ বলে (Const. volume

specific heat) যা $C_v = \left(\frac{du}{dT}\right)_v$ অপরটিকে ধ্রুব চাপ আপেক্ষিক তাপ বলা হয় $C_p = \left(\frac{dh}{dT}\right)_p$

C_v এবং C_p উভয়েই ধর্ম বা গুণ। C_v এবং C_p এর মধ্যেও একটি সম্পর্ক আছে যা নিচে নির্ণয় করা হলো।

$$h = u + pv = u + RT$$

$$dh = du + RdT$$

$$C_p dT = C_v dT + RdT$$

$$C_p - C_v = R$$

যে কোনো একটি বিশেষ আদর্শ গ্যাস এর জন্য R এর মান ধ্রুব এবং আদর্শ গ্যাস এর দুটি আপেক্ষিক তাপের অনুপাত একটি ধর্ম যা k দিয়ে উল্লেখ করা হয়।

$$k = \left(\frac{C_p}{C_v}\right)$$

$$\therefore \quad C_p = \left(\frac{kR}{k-1}\right)$$

$$C_v = \left(\frac{R}{k-1}\right)$$

উদাহরণ : একটি আদর্শ গ্যাস এর চাপমাত্রা 200 kN/m^2, তাপমাত্রা 300K, আপেক্ষিক আয়তন 0.5 m^3/kg, k = 1.4 গ্যাসটির C_v এবং C_p নির্ণয় কর।

$$PV = RT,\ R = \frac{PV}{T} = \frac{200 \times 0.5}{300} = 0.333 \text{ kJ/kg K}$$

$$R = c_p - c_v$$

$$\therefore \quad \frac{R}{c_V} = k - 1$$

$$\therefore \quad c_v = \frac{R}{k-1} = \frac{0.333}{0.4} = 0.833 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_p = R + c_v = 1.166 \text{ kJ/kgK}$$

RAMSDOG Library Dhaka

প্রশ্নমালা

১। প্রকৌশল তাপগতিবিদ্যা পর্যালোচনায় কি ধরনের বস্তু সাধারণত ব্যবহার করা হয়। **উত্তর :** বিশুদ্ধ বস্তু, গ্যাস, বাষ্প ও তরল পদার্থ যা রাসায়নিক বিক্রিয়া ঘটায় না।

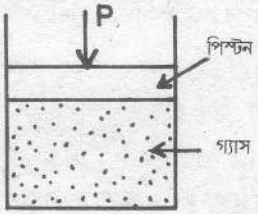
২। রুদ্ধতাপ (adiabatic) এবং বিচ্ছিন্ন (isolated) ব্যবস্থার মধ্যে কাজ ও তাপ প্রবাহের প্রভেদ কি?

উত্তর : রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় তাপ ব্যবস্থার সীমারেখার বাইরে যেতে পারে না। কাজ সীমারেখা অতিক্রম করতে পারে। বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থায় কাজ এবং তাপ কোনোটিই বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থার সীমারেখা অতিক্রম করতে পারে না।

৩। প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার মধ্যে কোন প্রক্রিয়ায় কাজ বেশি পাওয়া যায়। কেন?

উত্তর : প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায়। কেন–নিজে লেখ।

৪। কোনটি অপ্রত্যাবর্তী এবং কেন?



অতি আস্তে চাপ প্রয়োগ

(ক)

(খ)

উত্তর : (খ) অপ্রত্যাবর্তী।

৫। একটি চক্র সম্পাদন করার সময় একটি ইঞ্জিন একটি উৎস থেকে 1000 kJ তাপ গ্রহণ করে। এটি কি সম্ভব যে এই ইঞ্জিনটি পরিপার্শ্বের উপর 1200 kJ কাজ করতে পারবে। নিচের কোনটি সঠিক।

(ক) প্রথম সূত্র লঙ্ঘন করে।

(খ) দ্বিতীয় সূত্র লঙ্ঘন করে।

(গ) প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্র দুটিই লঙ্ঘন করে।

(ঘ) কোনো সূত্রই লঙ্ঘন করে না।

উত্তর : (গ), কেন নিজে লেখ।

৬। এটি কি সম্ভব যে একটি যন্ত্র একটি চক্র সম্পাদন করার সময় পরিপার্শ্ব থেকে 100 kJ কাজ গ্রহণ করে এবং পরিপার্শ্বে একটি উৎসে 100 kJ তাপ বর্জন করে। নিচের কোনটি ঠিক।

(ক) প্রথম সূত্র লঙ্ঘন করে।

(খ) দ্বিতীয় সূত্র লঙ্ঘন করে।

(গ) প্রথম ও দ্বিতীয় সূত্র দুটিই লঙ্ঘন করে।

(ঘ) কোনো সূত্রই লঙ্ঘন করে না।

উত্তর : (ঘ) কেন— নিজে লেখ।

৭। একটি ব্যবস্থা প্রথম একটি সাম্যাবস্থা থেকে দ্বিতীয় একটি সাম্যাবস্থার দুটি প্রক্রিয়ার মাধ্যমে গমন করে। একটি প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী, অন্যটি অপ্রত্যাবর্তী। নিচের কোনটি ঠিক ?

(ক) $\Delta U_{irr} = \Delta u_{rev}$

(খ) $\Delta u_{irr} > \Delta u_{rev}$

(গ) $\Delta u_{irr} < \Delta u_{rev}$

(ঘ) $\Delta u_{irr} = \Delta h_{rev.}$

উত্তর : (ক), কেন— নিজে লেখ।

৮। দেখাও যে যদি একটি বদ্ধ ব্যবস্থা একটি সমচাপ প্রক্রিয়ায় (constant pressure process) এবং প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় একটি প্রক্রিয়া সম্পন্ন করে তাহলে $\Delta H = Q$.

$$H = U + PV$$

$$dH = du + pdv + vdp, \quad [Vdp = 0, \text{ সমচাপ}]$$

$$\therefore \quad dH = du + pdv$$

$$= du + \delta W$$

$$= \delta Q$$

$$\Delta H = Q.$$

৯। কোনটি ঠিক (a) u = f (p) only

(b) u = f (v) only

(c) u = f (T) only

উত্তর : (c)

১০। কোনটি ঠিক (a) h = f (p) only

(b) h = f (v) only

(c) h = f (T) only

উত্তর : (c)

১১। দেখাও যে আইসেনট্রপিক প্রক্রিয়ার জন্য

$$n = k = \frac{C_p}{C_v}, \quad pv^n = C$$

এনট্রপি পরিবর্তনের সমীকরণ নিম্নরূপ

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{V_2}{V_1} + C_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

আইসেনট্রপিক প্রক্রিয়ায় $s_2 - s_1 = 0$

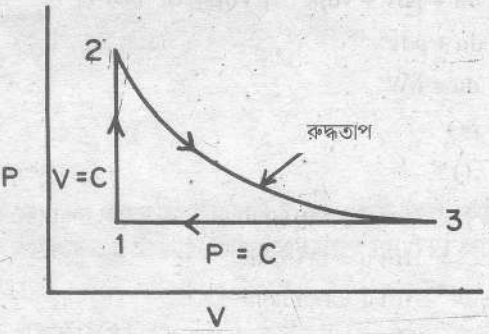
সুতরাং $$C_v \ln \frac{p_1}{p_2} = C_p \ln \frac{V_2}{V_1}$$

অথবা $$\ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{C_p}{C_v} \ln \frac{v_2}{v_1} = k \ln \frac{v_2}{v_1}$$

সুতরাং $$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

$$\therefore \quad n = k = \frac{C_p}{C_v}$$

১২। বদ্ধ ব্যবস্থায় একটি গ্যাস নিচের ছবি অনুযায়ী উল্লিখিত প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় একটি চক্র সম্পন্ন করে। 1–2 ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়ায় 235 kJ/kg তাপ গ্রহণ করে, 2–3 রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ায় পূর্বের চাপ পর্যন্ত প্রসারিত হয় এবং এর জন্য অন্তস্থ শক্তি 70 kJ/kg ব্যয় হয়, 3–1 সমচাপে প্রক্রিয়ায় পূর্বের আয়তনে ফিরে আসে এবং 200 kJ/kg তাপ বর্জন করে। প্রতিটি প্রক্রিয়ায় কাজ, তাপ এবং অন্তস্থ শক্তির পরিবর্তন নির্ণয় কর।



প্রথম সূত্র অনুযায়ী $\delta Q = du + \delta w$

সমাধান :

1–2 ধ্রুব আয়তন প্রক্রিয়া

প্রথম সূত্র অনুযায়ী

$$U_2 - U_1 = ({}_1Q_2) - 0 = 235 \text{ kJ/kg}$$

$${}_1W_2 = 0$$

$${}_1Q_2 = 235 \text{ kJ/kg}$$

2–3 রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়া

$${}_2Q_3 = 0$$

$${}_2W_3 = 0 - (U_3 - U_2) = -(-70) = +70 \text{ kJ/kg}$$

3–1 সমচাপ প্রক্রিয়া

$$U_1 - U_3 = {}_3Q_1 - {}_3W_1$$

পূর্ণ চক্রের জন্য অন্তশক্তির পরিবর্তন শূন্য, অর্থাৎ $\sum \Delta U = 0$

$$\therefore \quad (U_2 - U_1) + (U_3 - U_2) + (U_1 - U_3) = 0$$

$$235 + (-70) + (U_1 - U_3) = 0$$

$$\therefore \quad U_1 - U_3 = -165 \text{ kJ/kg}$$

$${}_3W_1 = {}_3Q_1 - (U_1 - U_3) = -200 + 165$$

$$= -35 \text{ kJ/kg}$$

চতুর্থ অধ্যায়

তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র

(Second Law of Thermodynamics)

তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্রের মতোই দ্বিতীয় সূত্রও কোনো পরীক্ষার মাধ্যমে প্রমাণ করা যাবে না। সূত্রটির দুটি সর্বজন স্বীকৃত সংজ্ঞা রয়েছে ; একটি ক্লসিয়াসের এবং অপরটি কেলভিন-প্লাঙ্কের।

৪.১ ক্লসিয়াসের সংজ্ঞা (The Clausius Statement)

এমন একটি যন্ত্র তৈরি অসম্ভব যা চক্রাকারে চালু থেকে শুধু তুলনামূলকভাবে ঠাণ্ডা বস্তু থেকে উষ্ণতর বস্তুতে তাপ প্রবাহিত করবে (It is impossible to construct a device that operates in a cycle and produces no effect other than the transfer of heat from a cooler body to a hotter body)। অন্যভাবে বলা যায়, এরূপ একটি যন্ত্র তৈরি অসম্ভব যা এমনভাবে চালু থাকবে যার ফলে নিম্নতাপের আধার থেকে উচ্চতাপের আধারে তাপ স্থানান্তর ছাড়া আর কিছুই হবে না। বক্তব্যটির বিশেষ পরীক্ষা প্রয়োজন। বক্তব্যটি এমনও নয় যে নিম্নতাপের বস্তু থেকে উচ্চ তাপের বস্তুতে তাপ স্থানান্তর সম্ভব নয়। অথচ রেফ্রিজারেটরে আসলে এটিই ঘটে আসছে। অবশ্য রেফ্রিজারেটরের বাইরে থেকে কাজের যোগান না দিলে তা কিছুতেই চালু থাকতে পারে না। বাইরের কাজের এই যোগানটিই আসলে নিম্নতাপ থেকে উচ্চতাপে তাপ স্থানান্তর ছাড়া দ্বিতীয় একটি বাস্তব ব্যাপার বা বিষয়।

ক্লসিয়াসের বক্তব্যে অনেক সময় এমনও বলা হয়, তাপ নিজে নিজে নিম্নতাপ থেকে উচ্চতাপে যেতে পারে না। অন্যকথায় বলা যায় যে তাপ সরাসরি নিম্নতাপ থেকে উচ্চতাপে যেতে পারে না বললেই বক্তব্যটি শেষ হয় না। বরং এটি এভাবে বলা যায় বক্তব্যটি সুষ্ঠুভাবে নির্দেশ করছে যে কোনো উপায়েই বা প্রক্রিয়ায়ই অন্য কোনোরূপ নিদর্শন না রেখে তাপ নিম্নতাপ থেকে উচ্চতাপে যেতে পারে না। বাইরে থেকে কাজ যোগান দেয়াটিই দ্বিতীয় নিদর্শন।

বলাই বাহুল্য সংজ্ঞাটি রেফ্রিজারেটর এবং হিট পাম্পের সাথে সংপৃক্ত। সত্যিকার অর্থে সংজ্ঞাটিতে এটিই বলা হয়েছে যে এমন একটি রেফ্রিজারেটর তৈরি অসম্ভব যা কোনো প্রকার কর্মশক্তির যোগান ছাড়া চলতে পারে। ফলে অর্থ দাঁড়ায় এই যে কার্যসম্পাদন সহগ (coefficient of performance) সর্বদা অসীম রাশি থেকে ছোট।

কেলভিন-প্লাঙ্ক (The Kelvin-Planck statement) : এমন একটি যন্ত্র তৈরি করা অসম্ভব যা চক্রাকারে চালু থেকে কেবল একটি বোঝা উত্তোলন করবে এবং একটি আধারের

সাথে তাপ বিনিময় করবে (It is impossible to construct a machine that will operate in cycle and produce no effect other than the raising of a weight and the exchange of heat with a single reservoir)। সংজ্ঞাটি আসলে হিট ইঞ্জিনের সাথে সংপৃক্ত। কার্য সম্পাদন এবং তাপ সঞ্চালনই হিট ইঞ্জিনের প্রধান অনুধাবনের বিষয়। বোঝা উত্তোলন মাধ্যাকর্ষণ শক্তির বিপরীতে কাজ করাই নির্দেশ করে। কার্যত সংজ্ঞাটি দ্বারা এটিই বিবৃত করা হয়েছে যে এমন একটি হিট ইঞ্জিন তৈরি সম্ভব নয় যা চক্রাকারে চালু থেকে একটি উচ্চ তাপের উৎস থেকে যে পরিমাণ তাপশক্তি গ্রহণ করবে হুবহু সেই পরিমাণ কাজই সম্পাদন করবে। কাজেই একমাত্র বিকল্প হলো কার্যকর ফ্লুইড থেকে কিছু তাপশক্তি নিম্নতাপের উৎসে অবশ্যম্ভাবীভাবে স্থানান্তরিত হবে। অতএব উচ্চ তাপের উৎস থেকে তাপ স্থানান্তরের ফলে কাজ তখনই সম্ভব যখন দুটি তাপের স্তর বিদ্যমান এবং উচ্চ তাপের স্তর থেকে প্রথমে হিট ইঞ্জিনে এবং সেখান থেকে নিম্নতাপের স্তরে তাপ প্রবাহিত হবে। অর্থাৎ অর্থ দাঁড়াচ্ছে এই যে এমন একটি হিট ইঞ্জিন তৈরি অসম্ভব যার তাপীয় দক্ষতা (thermal efficiency) 100%। অতএব কার্যশক্তি তাপের চেয়ে অধিক মূল্যবান এজন্য যে সর্বদা একে সম্পূর্ণভাবে তাপে পরিবর্তন করা যায় কিন্তু উল্টাটি কখনই সম্ভব নয়।

প্রথমে মনে হবে একটি বক্তব্যের সাথে অন্যটির কোনো মিল নেই। আসলে প্রথম সংজ্ঞাটি বিশেষভাবে হিট ইঞ্জিনের সাথে জড়িত এবং দ্বিতীয় সংজ্ঞাটি সরাসরি হিট ইঞ্জিনের বিপরীত যন্ত্র অর্থাৎ হিট পাম্পের সাথে জড়িত। উভয় সংজ্ঞাই প্রকৃতির উপর পর্যালোচনা ও গবেষণার সাক্ষ্য প্রমাণের উপর প্রতিষ্ঠিত এবং সমার্থক। উভয় সংজ্ঞার যে কোনোটিকে প্রাথমিক সংজ্ঞা হিসেবে ধরা যায়। অতএব একটিকে যদি কোনোভাবে প্রতিষ্ঠিত করা যায় তাহলে অন্যটি গৃহীত বলে বিবেচনা করা যাবে।

৪.২ দ্বিতীয় সূত্রের ব্যবহার (Uses of Second Law)

দ্বিতীয় সূত্রের ব্যবহার সম্বন্ধে বলতে গেলে বলা যায় যে এই সূত্র এবং এর অনুসিদ্ধান্ত (corollary) দ্বারা নিম্নলিখিত বিষয়গুলো নির্ধারণ করা সম্ভব :

ক. হিট ইঞ্জিনের সর্বোচ্চ দক্ষতা নির্ধারণ,

খ. রেফ্রিজারেটরের সর্বোচ্চ কার্যসম্পাদন সহগ (coefficient of performance, COP) নির্ধারণ।

গ. একটি রাসায়নিক বিক্রিয়া অথবা অন্য কোনো প্রক্রিয়া কিভাবে সংঘটিত হবে সে সম্বন্ধে ভবিষ্যদ্বাণী করা।

ঘ. তাপের এমন একটি মাপদণ্ডের সংজ্ঞাদান যা বস্তুর গুণাবলির উপর নির্ভরশীল নয় এবং

ঙ. ভৌত গুণাবলির (Physical properties) পারস্পরিক সম্পর্ক স্থাপন।

উদাহরণস্বরূপ দ্বিতীয় সূত্রের ব্যবহার পর্যালোচনা করে আমরা অনেক প্রশ্নের উত্তর দিতে পারি। যেমন :

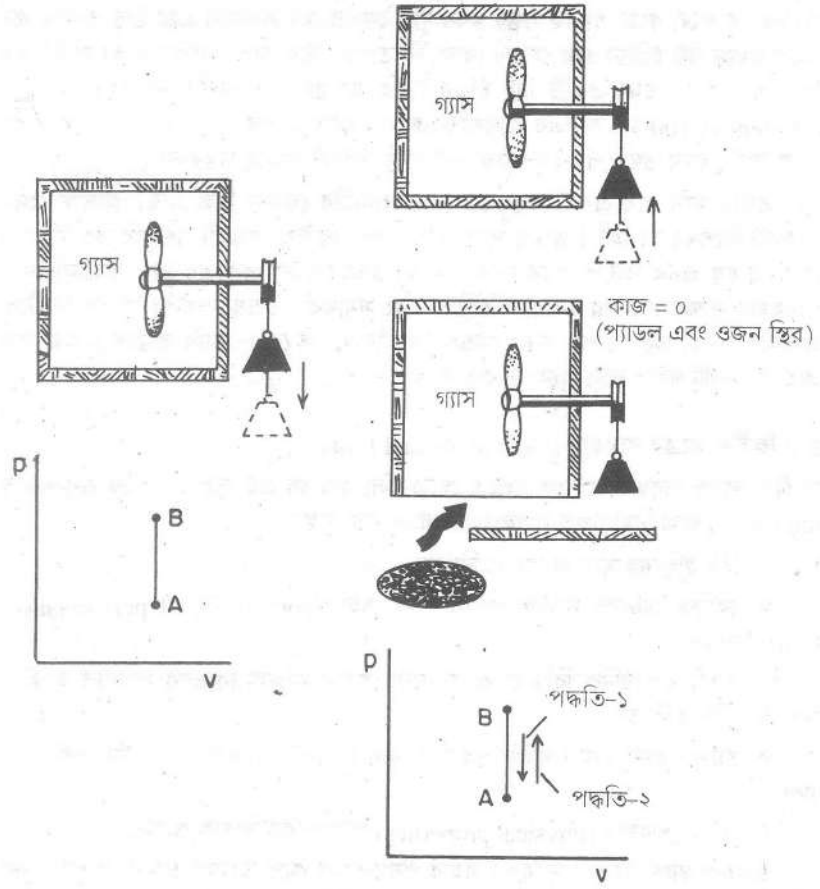
(১) একটি বাষ্পচালিত পাওয়ার প্লান্টের চুল্লির সর্বোচ্চ তাপ এবং শীতলীকরণে ব্যবহৃত পানির তাপমাত্রা জানা থাকলে প্লান্টটির সর্বোচ্চ কার্যদক্ষতা (efficiency) জানা যায়।

(২) কোনো কামরায় কোনো ফ্রিজ থাকলে কামরার তাপমাত্রা এবং সর্বনিম্ন তাপমাত্রার সৃষ্টি ক্ষমতা জানা থাকলে ফ্রিজটি চালু রাখতে সবচেয়ে কম কত শক্তির প্রয়োজন নির্ধারণ করা।

(৩) যে কোনো একটি জিনিসকে সর্বনিম্ন কত তাপমাত্রায় শীতলীকরণ করা যায়।

৪.৩ প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া (Reversible and Irreversible Process)

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া এমন একটি প্রক্রিয়া যা সংঘটিত হলে সংশ্লিষ্ট ব্যবস্থা (system) এবং পরিপার্শ্বকে যে কোনো উপায়ে আদি অবস্থায় ফিরিয়ে নিতে পারে। অন্য যে কোনো প্রক্রিয়াই অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

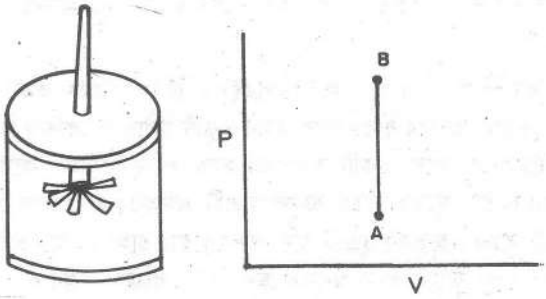


পরিপার্শ্ব দুভাবে পরিবর্তিত হয়েছে : (a) ওজন উচ্চতর স্তরে, (b) শক্তি আধারে জমাকৃত শক্তির পরিমাণ হ্রাস পেয়েছে।

চিত্র : ৪.১

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়াসমূহ গুরুত্বপূর্ণ এজন্য যে এরূপ প্রক্রিয়ায় যে কোনো কাজ উৎপাদনকারী উপায় থেকে সর্বনিম্ন শক্তির যোগান দিয়ে সর্বোচ্চ কাজ আদায় সম্ভব। অতএব এসব উপায়ের জন্য প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়াকে গুণগত তুলনার জন্য পরিমাপক (standard) হিসেবে গণ্য করা হয়। কোনো একটি প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী কিনা তা নির্ণয়ের জন্য দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগ অপরিহার্য।

৪.৩.১ নিদর্শন : দুটি কারণে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার পূর্বে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বিবেচনা করা যায়। প্রথমত— প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার চেয়ে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়াকে চিহ্নিত করা সহজতর। দ্বিতীয়ত— একবার কোনো নির্দিষ্ট অপ্রত্যাবর্তী ঘটনাকে চিহ্নিত করা গেলে শুধু এরূপ ঘটনার অনুপস্থিতি দ্বারা প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া চেনা যায়। এখন প্রশ্ন হলো কিভাবে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া চিহ্নিত করা যায়? এটি মনে রাখা প্রয়োজন যে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার ফলে সংশ্লিষ্ট ব্যবস্থা এবং পরিপার্শ্বকে উভয়ের আদি অবস্থায় ফিরিয়ে নেয়া যায়। অপরদিকে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় এটি অসম্ভব। অতএব কোনো প্রক্রিয়া ঘটানোর পর তার আদি অবস্থায় ফিরিয়ে নেয়া যায় কিনা তা নির্ণয় করে বলা যায় প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তী না অপ্রত্যাবর্তী। একটি প্রক্রিয়া যে অসম্ভব তা এভাবে প্রমাণ করা যায় : (১) মনে করা যাক প্রক্রিয়াটি সম্ভব। (২) পূর্ব অভিজ্ঞতার আলোকে অন্য একটি সম্ভব প্রক্রিয়ার সাথে প্রথমোক্ত প্রক্রিয়াটি যুক্ত করে এমন একটি চক্র (cycle) করা হলো যা দ্বিতীয় সূত্র লঙ্ঘন করে। এরূপ একটি চক্র করা যদি সম্ভব হয় তাহলে প্রথমোক্ত ধারণাটি মিথ্যা। অতএব উল্লিখিত প্রক্রিয়াটি অসম্ভব।



চিত্র : ৪.২

চিত্র অনুযায়ী একটি বদ্ধ, অনমনীয় এবং অন্তরিত (insulated) আধারের কথা ধরা যাক যাতে একটি গ্যাস রয়েছে। একটি প্যাডেল চাকা দ্বারা উল্লিখিত গ্যাসকে নাড়ানো যায়। একটি ভার কপিকলের সাহায্যে প্যাডেল চাকার সাথে এমনভাবে যুক্ত যে ভারটি নিচে নামলে চাকাটি ঘুরে। চাকা ঘূর্ণনের ফলে গ্যাসের উপর কাজ করা হয়, ফলে গ্যাসটি A অবস্থা থেকে B অবস্থায় আসে। প্রথম সূত্র অনুসারে এতে গ্যাসের অন্তস্থ শক্তির বৃদ্ধির দরুন গ্যাসের তাপমাত্রা বেড়ে যাবে।

প্রশ্ন হলো এটি কি একটি প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া? যদি তাই হয় তাহলে উল্লিখিত ব্যবস্থা এবং পরিপার্শ্ব উভয়কে আদি অবস্থায় ফিরিয়ে নেয়া সম্ভব। অন্য কথায় এমন কোনো প্রক্রিয়া দ্বারা ভারটি উপরে উঠানো যাবে যার ফলে গ্যাসের অন্তস্থ শক্তি কমে গিয়ে এর তাপ কমে যাবে। এরূপ প্রক্রিয়ায় বাধা কোথায়? এটি তো ঠিক মূল প্রক্রিয়ায় শুধু ভারটি নিচে নামানো হয়েছিল। অতএব বিপরীত প্রক্রিয়ায় শুধু ভারটিকে উপরে উঠানো হবে যাতে পরিপার্শ্বের কোনো পরিবর্তন হবে না। এরূপ বিপরীত প্রক্রিয়া যদি সম্ভব হয় তাহলে প্যাডেল নাড়ানো প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তীয়।

এখন প্রশ্ন হলো বিপরীত প্রক্রিয়া সম্ভব কিনা? আপাতত মনে করা যাক যে তা সম্ভব। এরূপ অবস্থায় এরূপ একটি চক্রের কথা চিন্তা করা যায় যা নিচের দুটি প্রক্রিয়ার সমষ্টি;

প্রক্রিয়া-১ : ভারটি উঠানোর ফলে গ্যাসের অন্তস্থ শক্তি এবং তাপমাত্রা কমে যাবে। অন্য কথায় গ্যাসটি B অবস্থা থেকে A অবস্থায় ফিরে আসবে।

প্রক্রিয়া-২ : এটি এমন একটি প্রক্রিয়া যাতে প্যাডেলটির অনড় অবস্থায় পরিপার্শ্ব থেকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসে তাপ স্থানান্তরিত হবে। এই প্রক্রিয়া চলতে থাকবে যতক্ষণ পর্যন্ত না গ্যাসের তাপ B অবস্থায় অর্থাৎ T_B হবে (উল্লিখিত অবস্থায় পরিপার্শ্বের তাপ অবশ্যই T_B এর উপরে থাকতে হবে)।

এই চক্রটি সম্পূর্ণ হওয়ায় একুনে ফল দাঁড়ায় এই যে;

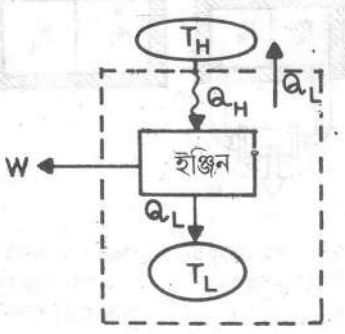
(১) ব্যবস্থাটি একটি চক্র সম্পূর্ণ করার ফলে এর আদি অবস্থায় ফিরে আসল।

(২) পরিপার্শ্বের দুটি পরিবর্তন হলো (ক) ভারটি উপরে উঠে আসল। (খ) পরিপার্শ্বের সঞ্চিত শক্তি কমে গেল।

প্রথম সূত্র প্রয়োগ করে বলা যায় যে, পরিপার্শ্বের শক্তি যে পরিমাণ কমলো সেই পরিমাণে ভারটির শক্তি বাড়লো। এভাবে ব্যবস্থাটিকে এমন একটি উপায় বা কৌশল হিসেবে গণ্য করা যায় যা চক্রাকারে চালু থেকে একটি আধারের সাথে শক্তি বিনিময় করে কাজ করছে। কেলভিন প্লাঙ্কের দ্বিতীয় সূত্রের সংজ্ঞা অনুসারে এটি অসম্ভব। অভিজ্ঞতা থেকে দেখা যায় দ্বিতীয় প্রক্রিয়াটি সম্ভব। অতএব চক্রটি যদি অসম্ভব হয় তাহলে প্রথম প্রক্রিয়াটি অবশ্যই অসম্ভব। কাজেই দেখা যাচ্ছে প্রথম অনুমান অর্থাৎ ১নং প্রক্রিয়া সম্ভব বলে যে ধারণা করা হয়েছিল তা সত্যি নয়। আর প্রথম প্রক্রিয়া সম্ভব নয় বলে নাড়ানো প্রক্রিয়াটি অপ্রত্যাবর্তী। এখানে বলা প্রয়োজন যে উপরিউক্ত সিদ্ধান্ত মিথ্যা হলে দ্বিতীয় সূত্রও মিথ্যা, যা কখনও হতে পারে না। কারণ অপরিসীম অভিজ্ঞতার উপর এটি প্রতিষ্ঠিত। উল্লেখ করা যায় যে, প্রথম সূত্রের মতো দ্বিতীয় সূত্রও পরীক্ষা দ্বারা প্রমাণ করা যায় না। তবে তাপগতিবিদ্যার সকল প্রক্রিয়া এই সূত্র মেনে চলে এবং একে ভুল প্রমাণিত করে না। একটি উদাহরণ দিয়ে ব্যাপারটি আরও পরিষ্কার করা যায়। এটি প্রমাণ করা যাক যে সীমিত তাপ পার্থক্যের মাধ্যমে তাপ স্থানান্তর একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।

প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার দুটি উদাহরণ দেয়া হলো।

T_H উচ্চ তাপমাত্রার একটি আধার থেকে T_L নিম্ন তাপমাত্রার আধারে তাপ স্থানান্তর যদি প্রত্যাবর্তী হয় তাহলে T_L থেকেও অন্য কোনো পরিণতি ছাড়া তাপ T_H-তে স্থানান্তর হতে পারে। মনে করা যাক এটি সম্ভব। এরূপ অবস্থায় চিত্র অনুযায়ী নিম্নরূপ চক্র তৈরি করা যায় :



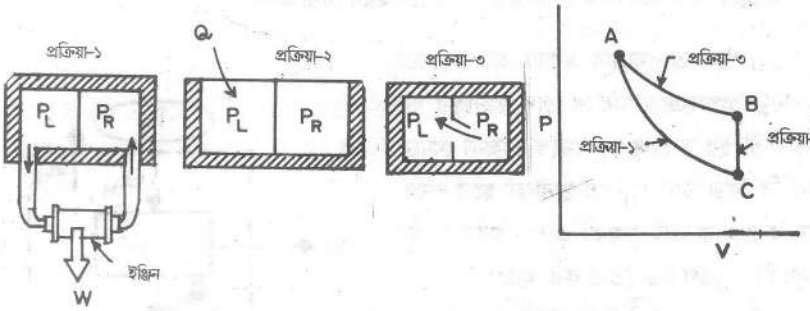
চিত্র : ৪.৩

১। মনে করি Q_H পরিমাণ তাপ T_H তাপমাত্রার আধার থেকে এমন একটি ইঞ্জিনে স্থানান্তর হচ্ছে যা চক্রাকারে চালু থেকে কাজ উৎপন্ন করছে এবং Q_L পরিমাণ তাপ T_L তাপমাত্রার আধারে পরিত্যাগ করছে। অভিজ্ঞতা থেকে বলা যায় যে এটি সম্ভব।

২। অতঃপর মনে করি Q_L পরিমাণ তাপ T_L তাপমাত্রার আধার থেকে T_H তাপমাত্রার আধারে স্থানান্তরিত হচ্ছে যা আমাদের অনুমান অনুযায়ী সম্ভব।

যেহেতু প্রথম প্রক্রিয়ায় Q_L পরিমাণ তাপ নিম্ন তাপের আধারে যোগ হচ্ছে এবং দ্বিতীয় প্রক্রিয়ায় সমান পরিমাণ তাপ প্রত্যাহার করা হচ্ছে সেহেতু প্রক্রিয়া দুটির সমষ্টিকে একটি চক্র বলা যায়। আর ইঞ্জিনটিও একটি চক্রাকারে চালু বলে ধরা যায়। অতএব ডটেড লাইনের ভেতরের সম্পূর্ণ সিস্টেমটি (ইঞ্জিন এবং T_L তাপের আধার) চক্র সম্পন্ন করছে। এই চক্রটির সমগ্র ব্যবস্থাটি যুগপৎভাবে কাজ উৎপন্ন এবং একটি আধারের সাথে তাপ বিনিময় করছে। এরূপ একটি চক্র দ্বিতীয় সূত্রের সুস্থু লঙ্ঘন।

ব্যাপারটি পর্যালোচনা করে দেখা যায় যে উল্লিখিত চক্রটির প্রথম প্রক্রিয়াটি বাস্তব অভিজ্ঞতার আলোকে সম্ভব এবং দ্বিতীয় প্রক্রিয়াটি সম্ভব নয় বলেই প্রস্তাবিত চক্রটি সম্ভব নয়। কাজে কাজেই T_L থেকে T_H তাপমাত্রায় তাপ স্থানান্তর অসম্ভব। অতএব এটিই প্রমাণিত হলো যে সীমিত তাপমাত্রার পার্থক্যের ফলে তাপ স্থানান্তর একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া।



গ্যাস প্রবাহ অব্যাহত থাকবে যতক্ষণ না $p_L = p_R$ কাজ $= -\Delta U$

কোনো গ্যাস প্রবাহ নেই। তাপ যোগ হচ্ছে যতক্ষণ পর্যন্ত অন্তস্থ শক্তি আদি শক্তির সমান না হচ্ছে $Q = \Delta U$, $p_L = p_R$

যেভাবে দেখানো হয়েছে সেভাবে গ্যাস প্রবাহ বিদ্যমান থাকবে যতক্ষণ পর্যন্ত না $p_R = 0$ এবং p_L আদি অবস্থায় ফিরে আসে।

চিত্র : ৪.৪

৪.৩.২ গ্যাসের মুক্ত প্রসারণ : এখন প্রমাণ করা যাক গ্যাসের মুক্ত প্রসারণ একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া। মনে করি একটি অন্তরিত আধারকে একটি পার্টিশান দ্বারা দুভাগে ভাগ করা আছে। একটি অংশে একটি গ্যাস ভর্তি অন্য অংশটি ভ্যাকুয়াম করা। এটি ব্যবস্থাটির A অবস্থা। এখন পার্টিশানটিতে একটি ফুটো করার ফলে গ্যাস প্রসারিত হয়ে সম্পূর্ণ আধারটি গ্যাসে ভরে গেল। এটি ব্যবস্থার B অবস্থা। গ্যাসের প্রসারণের দরুন কোনো কাজ সংঘটিত হলো না।

সমাধান

গ্যাসটিকে একটি ব্যবস্থা হিসেবে বিবেচনা করা যাক। প্রথমত, এটি ধরে নেয়া যাক যে বিপরীত প্রক্রিয়া সম্ভব। সম্পূর্ণ আধারটি গ্যাসে ভর্তি হওয়াতে বিপরীত প্রক্রিয়া শুরু হবে এবং আধারের অপর অংশের চাপের বিপরীতে গ্যাসটি প্রসারিত হবে। প্রক্রিয়াটি অবশ্যই এমনভাবে ঘটবে যাতে পরিপার্শ্বের উপর এর কোনো প্রতিক্রিয়া পড়বে না কারণ গ্যাসের মুক্ত প্রসারণ পরিপার্শ্বের সাথে কোনো পারস্পরিক ক্রিয়া-বিক্রিয়া ছাড়াই সংঘটিত হয়েছে।

অতঃপর তিনটি প্রক্রিয়া সমন্বিত একটি চক্রের কথা বিবেচনা করা যাক :

প্রক্রিয়া ১ : মনে করি A অবস্থায় আধারের এক অংশের গ্যাস একটি ইঞ্জিনের মাধ্যমে দ্বিতীয় অংশে প্রবাহিত হতে থাকবে যতক্ষণ দুই অংশের চাপ সমান না হয়। ইঞ্জিনের মাধ্যমে প্রসারিত হয়ে গ্যাসটি কিছু কাজ সম্পাদন করবে যাতে গ্যাসের অন্তস্থ শক্তি কমে যাবে। এরূপ প্রক্রিয়ায় তাপ স্থানান্তরিত হয়ে দুই অংশের তাপমাত্রা সমান হয়ে যাবে। এটি গ্যাসের C অবস্থা।

প্রক্রিয়া ২ : আধারের আংশিক অন্তরক অপসারণ করে এতে তাপ এমনভাবে যোগ করা সম্ভব যাতে গ্যাস তার আদি অবস্থায় ফিরে আসে। অর্থাৎ গ্যাসটি এখন B অবস্থায় আছে। আসলে B অবস্থাটি গ্যাসের মুক্ত প্রসারণের ফলেই হয়েছিল।

প্রক্রিয়া ৩ : মনে করি B অবস্থা থেকে মুক্ত প্রসারণের বিপরীত প্রক্রিয়ায় গ্যাসটি B অবস্থা থেকে এর আদি অবস্থা অর্থাৎ A অবস্থায় ফিরে গেল। এরূপভাবে একটি চক্র সম্পূর্ণ হলো।

এই চক্রটিতে একটি তাপের আধার থেকে তাপ শোষণ এবং কাজ সম্পাদিত হলো। এভাবে দ্বিতীয় সূত্র লঙ্ঘিত হলো। সুতরাং পরীক্ষায় দেখা যাবে যে পূর্ব অভিজ্ঞতার আলোকে প্রক্রিয়া-১ এবং প্রক্রিয়া-২ বাস্তবসম্মত কিন্তু প্রক্রিয়া-৩ কে বাস্তব সম্মত বলে ধরে নেয়া হয়েছিল। দ্বিতীয় সূত্র যদি সত্যি হয় তাহলে প্রক্রিয়া-৩ সম্বন্ধে যে অনুমান করা হয়েছে তা ঠিক নয়। অতএব মুক্ত প্রসারণের বিপরীত প্রক্রিয়া বাস্তবসম্মত নয় বলে গ্যাসের মুক্ত প্রসারণ অবশ্যই অপ্রত্যাবর্তী।

৪.৩.৩ প্রত্যাবর্তী ও অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার ধর্ম : পূর্ববর্তী দুটি উদাহরণের যুক্তি প্রমাণের দ্বারা প্রমাণ করা যায় যে কতকগুলো প্রক্রিয়া যেমন মিশ্রণ প্রক্রিয়া, কোনো বস্তুর অস্থিতিস্থাপক বিকৃতি এবং আরও কিছু এ ধরনের ফলাফল অপ্রত্যাবর্তী। এ থেকে আমরা প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া সম্বন্ধে নিম্নলিখিত উপসংহারে উপনীত হতে পারি : যদি

* ঘর্ষণ (Friction),
* সীমিত তাপ পার্থক্যের দরুন তাপ স্থানান্তর,
* মুক্ত প্রসারণ (Free expansion),
* মিশ্রণ (Mixing) এবং
* অস্থিতিস্থাপক বিকৃতি (Inelastic deformation)।

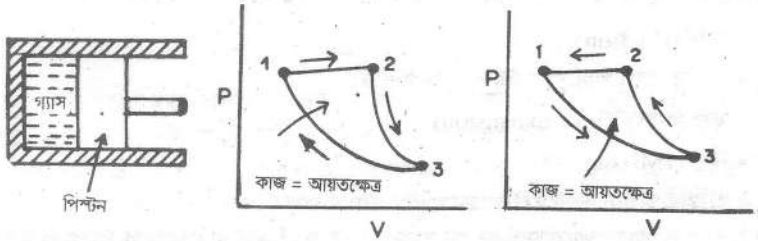
কোনো প্রক্রিয়ায় থাকে তাহলে সে প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী হবে না। আসলে সকল প্রাকৃতিক প্রক্রিয়াই অপ্রত্যাবর্তী। কাজেই প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া একটি আদর্শ কল্পনা মাত্র। কোনো রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া যদি ঘর্ষণ ছাড়া অতি ধীরে সম্পাদিত হয় তাহলে তা হবে প্রত্যাবর্তী। একই প্রক্রিয়া দ্রুতগতিতে সম্পন্ন হলে তা অপ্রত্যাবর্তী। কোনো ব্যবস্থার তাপমাত্রা এবং পরিপার্শ্বের তাপমাত্রা যদি যুগপৎভাবে পরিবর্তিত হয় তাহলে তাপ স্থানান্তরও প্রত্যাবর্তী হতে পারে। কিন্তু প্রত্যাবর্তী তাপ স্থানান্তরের কোনো যন্ত্র তৈরির নকশা প্রণয়ন বাস্তবে সম্ভব নয়। কোনো নজলের (nozzle) মাধ্যমে ঘর্ষণহীন তরল অথবা বায়বীয় পদার্থের নিয়মিত প্রবাহ প্রত্যাবর্তী। কোনো স্প্রিং এর সম্প্রসারণ প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার প্রায় কাছাকাছি। অতি ক্ষুদ্র একটি বোঝা যদি কোনো স্প্রিং এ অতি ধীরে প্রয়োগ করা হয় তাহলে স্প্রিংটি সামান্য প্রসারিত হবে। এই প্রক্রিয়াটি তখনই প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার প্রায় কাছাকাছি হিসেবে গণ্য করা যায় যদি উল্লিখিত বোঝাটি অতি ধীরে প্রয়োগ এবং অতি ধীরে অপসারণ করা হয়। পক্ষান্তরে এতে অনিয়ন্ত্রিত কম্পনের সৃষ্টি হতে পারে যাতে এটি আর প্রত্যাবর্তী থাকবে না।

৪.৪ প্রত্যাবর্তী চক্র (Reversible Cycles)

কোনো একটি চক্র যদি সম্পূর্ণভাবে প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার সমষ্টি হয় তাহলে তাকে প্রত্যাবর্তী চক্র বলে। উদাহরণস্বরূপ মনে করি কোনো আদর্শ গ্যাস একটি চোঙ্গের একটি পিস্টনের চাপে রয়েছে। মনে করি গ্যাসটিতে নিম্নলিখিত প্রক্রিয়াসমূহ সংঘটিত হলো।

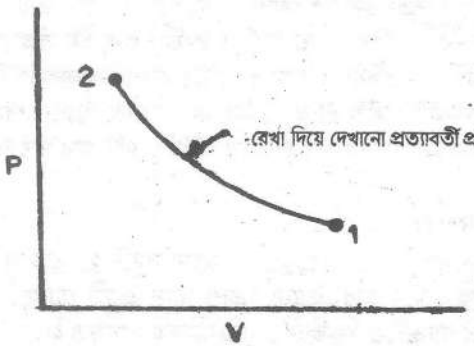
প্রক্রিয়া	বর্ণনা	মন্তব্য
1–2	ধ্রুব চাপে গ্যাসটি প্রত্যাবর্তীভাবে প্রসারিত হলো।	প্রক্রিয়াটির দ্বারা গ্যাসে তাপ যোগ হবে এবং গ্যাসটি পরিপার্শ্বের উপর কাজ করবে।
2–3	গ্যাসটি রুদ্ধতাপীয় প্রত্যাবর্তী–ভাবে প্রসারিত হয়ে আদি তাপমাত্রায় ফিরে আসল।	সংঘটিত প্রক্রিয়ায় তাপ স্থানান্তর হবে না এবং গ্যাসটি পরিপার্শ্বের উপর কাজ করবে।
3–1	গ্যাসটি প্রত্যাবর্তীভাবে ধ্রুব চাপে সংকুচিত হয়ে আদি অবস্থায় ফিরে আসবে।	সংঘটিত প্রক্রিয়ায় গ্যাসের উপর কাজ করা হবে এবং তাপ অপসারিত হবে।

চক্রটি PV ডায়াগ্রামে দেখানো হলো। যেহেতু প্রসারণের সময়কার গড় চাপ সংনমনের সময়কার গড় চাপের অধিক, সেহেতু এই নিট কাজ সম্পাদিত হয়েছে। চক্রের আয়তক্ষেত্র কাজের পরিমাণ নির্দেশ করছে।



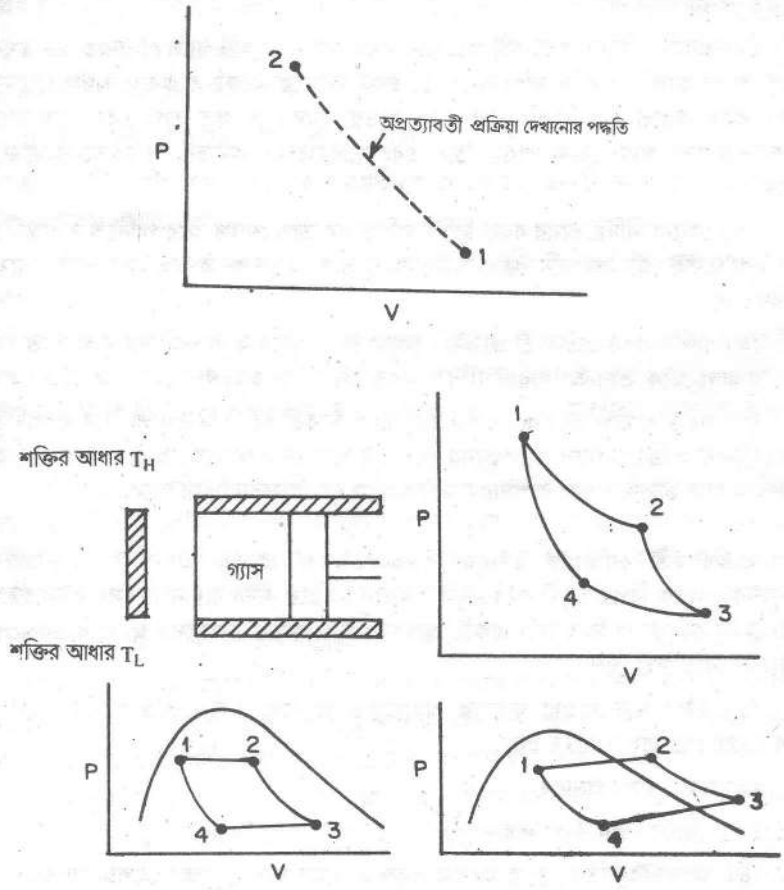
তাপগতিবিদ্যার স্থানাঙ্ক ছবিতে সাম্যাবস্থা এবং অসাম্যাবস্থার ব্যবস্থা দেখানোর একটি বিশেষ পদ্ধতি আছে।

যে প্রক্রিয়াগুলো প্রত্যাবর্তী সেই প্রক্রিয়াগুলোর অন্তর্বর্তী প্রক্রিয়াগুলো আপাত স্থায়ী প্রক্রিয়ার মাধ্যমে প্রত্যাবর্তন করে এবং এই অবস্থানগুলো সাম্যাবস্থা ধরে নেয়া হয় তাই এগুলো স্থানাঙ্ক ছবিতে সরাসরি দেখানো সম্ভব এবং এই প্রক্রিয়াগুলোকে রেখা দিয়ে দেখানো হয়।



অন্যদিকে যদি প্রক্রিয়াগুলো অপ্রত্যাবর্তী হয় তাহলে অন্তর্বর্তী প্রক্রিয়াগুলো অসাম্যাবস্থায় থাকে, তাই সেগুলোর অন্তর্বর্তী অবস্থান স্থানাঙ্ক ছবিতে দেখানো সম্ভব নয়।

তবে প্রক্রিয়াগুলোর প্রথম এবং শেষ অবস্থান সাম্যাবস্থায় থাকে তাই এই দুটি অবস্থান স্থানাঙ্ক ছবিতে দেখানো সম্ভব, আর অন্তর্বর্তী অবস্থাগুলো ভাঙ্গা ভাঙ্গা লাইন দিয়ে দেখানো হয় যা চিত্রে দেখানো হয়েছে।



চিত্র : ৪.৫

প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার উদাহরণ : বাস্তবে কোনো পরিবর্তন পুরোপুরি প্রত্যাবর্তী নয়। তবে যে সকল পরিবর্তন ধীরে ধীরে ঘটে সেগুলো সাধারণত প্রায় প্রত্যাবর্তী হয়ে থাকে। নিচের উদাহরণগুলো দ্বারা ব্যাপারটিকে আরো পরিষ্কার করা যায়।

(১) কোনো একটি নির্দিষ্ট ভরের গ্যাসে যদি ধ্রুব চাপে তাপ যোগ করা যায় তাহলে উল্লিখিত গ্যাস প্রসারিত হয়ে কিছু কাজ সম্পাদন করবে। যদি সমপরিমাণ কাজ একই গ্যাসে সরবরাহ করা হয় তাহলে সেই একই পরিমাণ তাপ-উদগীরণ করবে। এখানে অবশ্য ধরা হয়েছে যে উল্লিখিত প্রক্রিয়াগুলোতে কোনো ঘর্ষণ হবে না। তা না হলে ঘর্ষণের ফলে বেশ কাজ নষ্ট হবে। অপরদিকে যদি পরিবহন, পরিচলন অথবা বিকিরণ এর যে কোনো একটি, দুটি বা সবগুলোর সাথে কার্যকর থাকার দরুন তাপ বেরিয়ে যায় তাহলে উল্লিখিত তাপ আর ফেরত পাওয়া যাবে না।

(২) একটি সমোষ্ণ প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ায় যখন কোনো একটি গ্যাস প্রসারিত হয় তখন তাপ শোষণ করে কিছু কাজ সম্পাদন করে। একই গ্যাসকে সংকুচিত করলে অর্থাৎ গ্যাসের উপর কাজ করলে সমপরিমাণ তাপ শক্তি পাওয়া যাবে। শোষিত তাপ এবং গ্যাস দ্বারা সম্পাদিত কাজ গ্যাস থেকে পাওয়া তাপ এবং সরবরাহকৃত কাজের (সংকোচনের কাজ) সমান।

(৩) কোনো নির্দিষ্ট ভরের বরফ নির্দিষ্ট পরিমাণের তাপ শোষণ করে পানিতে রূপান্তরিত হয় এবং একই পরিমাণ পানি থেকে সমপরিমাণ তাপ অপসারণ করলে সেই পানি বরফে পরিণত হবে।

(৪) বাষ্পীকরণও প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া। কারণ তাপ শোষণ করে পানি বাষ্পে পরিণত হয় আবার বাষ্প থেকে তাপ অপসারণে বাষ্প পানিতে রূপান্তরিত হয়।

(৫) সমস্ত সমোষ্ণ এবং রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া প্রত্যাবর্তী হবে যদি এগুলো ধীরে সম্পাদিত হয়। সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় গ্যাস সংকোচনের ফলে এর আয়তন কমে যায়। আবার সমস্ত প্রক্রিয়া ঘর্ষণহীন হলে উল্লিখিত চাপ অপসারণ করলে গ্যাস মূল আয়তন ফিরে পাবে।

অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার উদাহরণ : অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া এমন যে প্রক্রিয়াটির অনুঘটকগুলোকে বিপরীতমুখী করেও মূল অবস্থায় ফিরিয়ে আনা যায় না। যেসব ঘটনা হঠাৎ ঘটে যেমন যে কোনো বিস্ফোরণ একটি অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার উদাহরণ। আরো কতকগুলো উদাহরণ নিচে দেয়া গেল :

(১) হঠাৎ ঘটে যাওয়া গ্যাসের অনিয়ন্ত্রিত প্রসারণ, যদিও এটি সমোষ্ণ অথবা রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় সংঘটিত হয়,

(২) জুল-থমসন প্রসারণ,

(৩) ঘর্ষণের দরুন উৎপাদিত তাপ,

(৪) কোনো বৈদ্যুতিক বাধার মাধ্যমে বিদ্যুৎ প্রবাহের ফলে যে তাপ উৎপন্ন হয় এবং

(৫) বিভিন্ন বস্তুর মধ্যে তাপ পার্থক্যের দরুন পরিবহন অথবা বিকিরণের মাধ্যমে তাপ স্থানান্তর।

৪.৪.১ কার্নো চক্র (The Carnot Cycle) : কার্নো চক্র প্রত্যাবর্তী বলে ইঞ্জিন এবং রেফ্রিজারেটর উভয় এর সর্বোচ্চ কর্মদক্ষতা নির্ণয়ে ব্যবহার করা যায়। অন্য কথায় উল্লিখিত

যন্ত্র দুটির সর্বোচ্চ কর্মদক্ষতার সীমারেখা নির্ধারণের জন্য এই চক্রটি বিশেষভাবে চিহ্নিত। কারণ কার্নো ইঞ্জিন সর্বোচ্চ কর্মদক্ষতার সাথে তাপকে কার্যে রূপান্তরিত করে। ইঞ্জিনটি দুটি শক্তির উৎস থেকে শক্তি বিনিময় করে এবং সর্বদা চারটি প্রক্রিয়ার সাথে সংপৃক্ত : দুটি প্রত্যাবর্তীয় সমোষ্ণ তাপীয় প্রক্রিয়া এবং দুটি প্রত্যাবর্তীয় রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া। কার্নো চক্র বিভিন্ন ব্যবস্থায় কার্যকর করা যায়। উদাহরণস্বরূপ ব্যবস্থাটি তরল, বায়বীয়, বৈদ্যুতিক কোষ, একটি সাবানের বুদবুদ, একটি ইস্পাতের তার, একটি রাবার ব্যান্ড ইত্যাদির কথা উল্লেখ করা যায়। যে কোনো অবস্থায় কার্নো চক্রে নিম্নলিখিত জিনিসগুলো সংপৃক্ত :

১। একটি ব্যবস্থা (system)

২। T_H তাপমাত্রার একটি শক্তির আধার

৩। T_L তাপমাত্রা একটি শক্তির আধার যেখানে $T_H > T_L$

৪। একটি নির্দিষ্ট সময় পর পর ব্যবস্থাটিকে যে কোনো একটি অথবা উভয় আধার থেকে অন্তরিত করার উপায়

৫। পরিপার্শ্বের একটি অংশ যা কাজ শোষণ অথবা উল্লিখিত ব্যবস্থায় কাজ সরবরাহ করে।

কার্নো চক্রটি পর্যবেক্ষণের উদ্দেশ্যে এমন একটি ব্যবস্থা বিবেচনা করা যায় যাতে একটি গ্যাস একটি অন্তরিত চোঙ্গ এবং একটি অন্তরিত পিস্টনের মধ্যে আবদ্ধ রয়েছে। চোঙ্গের অন্তরকটি অপসারণ করে চোঙ্গটিকে যে কোনো একটি শক্তির আধারের সংস্পর্শে আনা যায়।

কার্নো চক্রে কার্যনির্বাহক বস্তুটি উৎস থেকে তাপ গ্রহণ করে একটি সমোষ্ণ তাপীয় প্রসারণ, একটি রুদ্ধতাপীয় প্রসারণ এবং দুটি সঙ্কোচন (যার একটি ধ্রুব তাপীয় অপরটি রুদ্ধ তাপীয়) এর মাধ্যমে তাপকে কাজে রূপান্তরিত করে এবং কিছু তাপ বর্জন করে আদি অবস্থায় ফিরে আসে। এই চক্রটিই কার্নো চক্র বলে পরিচিত।

পুরো চক্রটিকে চিত্রের মাধ্যমে নিম্নলিখিতভাবে বর্ণনা করা যায় (৪.৫ চিত্রের নিচেরটি)।

প্রক্রিয়া 1–2 উচ্চ তাপমাত্রাসম্পন্ন আধার থেকে গ্যাসে তাপ স্থানান্তর। তাপ অন্তরকটি চোঙ্গ থেকে অপসারণপূর্বক চোঙ্গটিকে T_H সম্পন্ন আধারের সংস্পর্শে আনা। তখন গ্যাস অত্যন্ত ধীর গতিতে প্রসারিত হয়ে পরিপার্শ্বের উপর কাজ সম্পাদন করবে। গ্যাসের প্রসারণে এর তাপমাত্রা কমার প্রবণতা দেখা দিবে। কিন্তু T_H তাপমাত্রার আধার থেকে প্রত্যাবর্তীয় এবং সমোষ্ণ তাপীয় প্রসারণ প্রক্রিয়ায় গ্যাসে তাপ যোগ হওয়ার ফলে এর তাপ T_H এর প্রায় সমান থাকবে। যেহেতু আধার থেকে তাপ গ্যাসে স্থানান্তরিত হচ্ছে গ্যাসের তাপমাত্রা T_H এর বেশি পৌছতে পারবে না। গ্যাসের তাপমাত্রা কমতে দেয়া যাবে না। কারণ উদ্দেশ্য হলো সর্বোচ্চ কাজ পাওয়া এটি PV চিত্র থেকেও পরিষ্কার যে এভাবে তাপমাত্রা কমতে দিলে সমোষ্ণ তাপীয় প্রসারণে কাজের পরিমাণ কমে যাবে। যখন গ্যাসটি 2 এর অবস্থায় আসবে তখন চোঙ্গটি উচ্চ তাপমাত্রার আধারের সংস্পর্শ থেকে আলাদা করে অন্তরকটি যথাস্থানে রাখা হবে।

BANGLADESH Library Dhaka

প্রক্রিয়া 2–3 : এই প্রক্রিয়ায় গ্যাসটি প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হয়ে কাজ সম্পাদন করবে। ইহার ফলশ্রুতিতে গ্যাসের চাপ ও তাপমাত্রা কমে যাবে। যখন গ্যাসের তাপমাত্রা T_L এর সামান্য কিছু বেশি হবে তখন চোঙ্গটির অন্তরককে অপসারণ করে একে T_L তাপমাত্রাসম্পন্ন আধারের সংস্পর্শে আনা হবে।

প্রক্রিয়া 3–4 : এ অবস্থায় গ্যাসটি প্রত্যাবর্তী ধ্রুব তাপীয় প্রক্রিয়ায় সংকুচিত হবে এবং T_L তাপমাত্রার আধারে তাপ এমনভাবে স্থানান্তরিত হবে যাতে গ্যাসের তাপমাত্রা T_L এর সামান্য উপরে থাকে। এই সংকোচন প্রক্রিয়াটি চলতে থাকবে যতক্ষণ না গ্যাসটি 4 অবস্থায় পৌঁছে। অবস্থা 4 এমনভাবে বেছে নিতে হবে যাতে প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার মাধ্যমে 1 অবস্থায় পৌঁছা যায়। 4 অবস্থায় পৌঁছার সাথে সাথে চোঙ্গটিকে নিম্ন তাপের সংস্পর্শ থেকে সরিয়ে তাপের অন্তরকটিকে পুন:স্থাপিত করতে হবে।

প্রক্রিয়া 4–1 : এ অবস্থায় গ্যাসটিকে প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার মাধ্যমে সংকুচিত করে 1 অবস্থায় ফিরিয়ে নিতে হবে। এই প্রক্রিয়ায় গ্যাসে কাজ যোগ হওয়ার ফলে এর তাপমাত্রা T_L এর সামান্য কিছু উপর থেকে T_H এর সামান্য কিছু নিচে পৌঁছে যাবে।

PV ডায়াগ্রামের আয়তক্ষেত্রটি নিট কাজ সম্পাদনের পরিমাণ নির্দেশ করে। যেহেতু ব্যবস্থাটি একটি চক্র সম্পাদন করেছে সেহেতু গ্যাসের সঞ্চিত শক্তির নিট পরিবর্তন শূন্য। চক্রটির নিট ফলাফল হবে, (১) T_H তাপমাত্রার শক্তির আধার থেকে তাপ অপসারণ, (২) T_L তাপের আধারে শক্তির বৃদ্ধি এবং (৩) কাজ সম্পাদন। প্রথম সূত্র প্রয়োগ করে বলা যায় যে T_H তাপমাত্রার যে পরিমাণ তাপ গ্রহণ এবং T_L তাপমাত্রায় যে পরিমাণ তাপ প্রত্যাখ্যাত হয় এ দুটির বিয়োগফল কাজ সম্পাদনের পরিমাণ নির্দেশ করে।

উল্লিখিত চক্রের কাজের বাহকটি যদি গ্যাস না হয়ে কোনো খাঁটি বস্তুর তরল বাষ্পের মিশ্রণ হয় তাহলে 1 থেকে 2 এর এবং 3 থেকে 4 এর প্রক্রিয়াদ্বয় সমোষ্ণ প্রক্রিয়া। 1 থেকে 2 তে তরল বস্তুটি বাষ্পে পরিণত হবে এবং 3 থেকে 4 তে বাষ্প তরলে পরিণত হবে। যদি সমস্ত তরল বাষ্পে পরিণত হয়ে ধ্রুব তাপ প্রক্রিয়ায় তাপ যোগের সময় বাষ্প অতিতাপিত (superheated) হয়ে থাকে তাহলে যে অংশে তরল ও বাষ্পের মিশ্রণ ছিল শুধু সে অংশটি ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়ায় সংঘটিত হবে। চিত্রে PV ডায়াগ্রাম দেখানো হলো। মনে রাখা দরকার যে কার্নো চক্রে তাপ যোগ এবং প্রত্যাখ্যান প্রক্রিয়াদ্বয় সর্বদা সমোষ্ণ প্রক্রিয়া। কার্নো চক্রে তাপ যোগ এবং প্রত্যাখ্যান অন্য কোনো প্রক্রিয়ায় না হয়ে শুধু প্রত্যাবর্তী সমোষ্ণ তাপ প্রক্রিয়ায় সংঘটিত হবে। এ চক্রের কার্যদক্ষতা পরে আলোচনা করা হবে।

৪.৪.২ কার্নোর বিপরীত চক্র (The Reversed Carnot Cycle) : একটি কার্নো ইঞ্জিন বিপরীতভাবে পরিচালিত করলে তা রেফ্রিজারেটর অথবা হিট পাম্প হিসেবে কাজ করবে। এটি নিম্ন তাপের আধার থেকে তাপ শোষণ করে উচ্চ তাপের আধারে তা প্রত্যাখ্যান করবে। এটি করার জন্য পরিপার্শ্ব থেকে কাজের প্রয়োজন হবে। সাংসারিক রেফ্রিজারেটরে এর প্রকোষ্ঠ থেকে তাপ শোষণ করে পরিপার্শ্বের বাতাসে তা প্রত্যাখান করে এবং বৈদ্যুতিক মোটর কাজের যোগান দেয়।

কার্নো রেফ্রিজারেটারের কার্যনির্বাহী বস্তু সমোষ্ণ তাপীয় প্রক্রিয়া T_L তাপমাত্রায় $|Q_L|$ পরিমাণ তাপ শোষণ করে। অত:পর এর তাপ রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় T_H এ উন্নীত হয়। সমোষ্ণ তাপীয় প্রক্রিয়ায় T_H তাপমাত্রায় $|Q_H|$ পরিমাণ তাপ উচ্চতর তাপের আধারে প্রত্যাখ্যাত হয়। অতঃপর একটি রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ার মাধ্যমে চক্রটি সম্পূর্ণ হওয়ার ফলে কার্যনির্বাহী বস্তুর তাপ কমে আদি অবস্থায় ফিরে আসে। উল্লিখিত সমস্ত প্রক্রিয়াই প্রত্যাবর্তীয়।

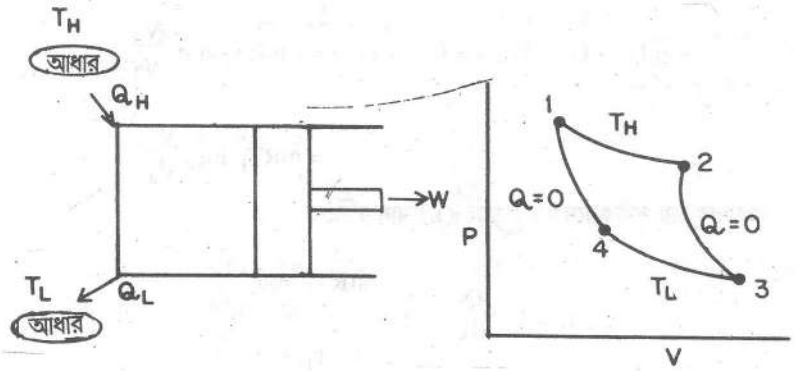
প্রথম সূত্র প্রয়োগ করে,

নিট কাজ $= |Q_H| - |Q_L|$

কোনো নির্ধারিত তাপের সীমারেখায় একটি কার্নো রেফ্রিজারেটর অথবা হিট পাম্পের কার্যসম্পাদন সহগ সর্বোচ্চ। যত যাই হোক অন্যান্য কারণের মধ্যে অতি সামান্য তাপমাত্রার পার্থক্যের জন্য তাপ স্থানান্তর বাস্তবায়নসম্মত নয় বলে কার্নো ইঞ্জিন এবং রেফ্রিজারেটর তৈরি এবং ব্যবহার হয় না। তা সত্ত্বেও প্রকৌশলগত কাজের সর্বোচ্চ সীমা নির্ধারণের পরিমাপক হিসেবে কার্নো চক্রের যথেষ্ট গুরুত্ব রয়েছে।

৪.৪.২.১ উদাহরণ : শক্তির আধারে তাপমাত্রা T_H এবং T_L দ্বারা এমন একটি কার্নো ইঞ্জিনের তাপীয় কর্মদক্ষতা প্রকাশ করা যাক যার কার্যনির্বাহী বস্তুটি একটি আদর্শ গ্যাস।

প্রথমেই ইঞ্জিনটি শক্তির আধার এবং PV ডায়াগ্রাম অঙ্কন করি।



তাপীয় কার্যদক্ষতার সংজ্ঞা থেকে,

$$\eta = \frac{\oint dW}{Q_{in}} = \frac{W}{Q_{in}}$$

একটি বদ্ধ ব্যবস্থায় প্রথম সূত্র প্রয়োগের মাধ্যমে

$$\eta = \frac{\oint dW}{Q_{in}} = \frac{\oint dQ}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|}$$

এখানে Q_{in} অথবা $|Q_H|$, T_H তাপমাত্রার আধার থেকে ইঞ্জিনে তাপ স্থানান্তরের মোট পরিমাণ এবং Q_{out} অথবা $|Q_L|$, T_L তাপমাত্রায় ইঞ্জিন থেকে আধারে তাপ স্থানান্তরের মোট পরিমাণ। 1 থেকে 2 এ একটি সমোষ্ণ প্রত্যাবর্তীয় প্রসারণ প্রক্রিয়ায় প্রথম সূত্র প্রয়োগ করে,

$$|Q_H| = U_2 - U_1 + W_{1-2}$$

একটি আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে অভ্যন্তরীণ শক্তি শুধু তাপের উপর নির্ভরশীল এবং সমোষ্ণ তাপ প্রক্রিয়ায় $\Delta U = 0$। $[\because U = f(T)]$

একটি বদ্ধ ব্যবস্থার প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়ায় $W = \int p dv$

$$\therefore \quad |Q_H| = 0 + \int_1^2 p dv$$

আদর্শ গ্যাসের অবস্থার সমীকরণ থেকে p এর মান বসিয়ে,

$$|Q_H| = 0 + \int_1^2 \frac{mRT_H}{V} dv = mRT_H \int_1^2 \frac{dV.}{V} \quad [\because m, R \text{ এবং } T \text{ ধ্রুব}]$$

$$= mRT_H \log_e \frac{V_2}{V_1}$$

একই যুক্তি অনুসারে,

$$|Q_L| = U_3 - U_4 - W_{3-4} = 0 - \int_3^4 p dv = - mRT_L \log_e \frac{V_4}{V_3}$$

$$= mRT_L \log_e \frac{V_3}{V_4}$$

কার্যদক্ষতার সমীকরণে $|Q_H|$ এবং $|Q_L|$ মান বসিয়ে,

$$\eta = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{mRT_L \log_e \frac{V_3}{V_4}}{mRT_H \log_e \frac{V_2}{V_1}}$$

প্রত্যাবর্তীয় রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় 2–3 এবং 4–1 এর মধ্যে ধ্রুব আপেক্ষিক তাপসম্পন্ন আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে

$$\frac{V_3}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{1/k-1} = \left(\frac{T_H}{T_L}\right)^{1/k-1}$$

এবং

$$\frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{1/k-1} = \left(\frac{T_H}{T_L}\right)^{1/k-1}$$

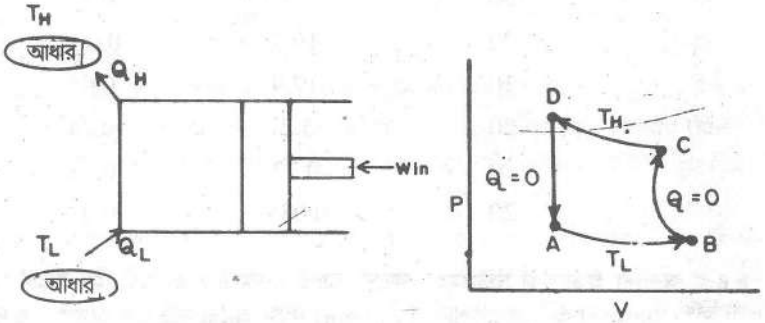
$$\therefore \quad \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1} \text{ এবং } \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\therefore \quad \eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

প্রণিধানযোগ্য বিষয় এই যে, যে কোনো একটি আধারের নির্ধারিত তাপমাত্রার জন্য উভয়ের মধ্যকার তাপমাত্রার পার্থক্য বাড়ালে কার্যদক্ষতা বেড়ে যায়।

৪.৪.২.২. উদাহরণ : শক্তির আধারের T_L এবং T_H তাপমাত্রার সাহায্যে একটি কার্নো রেফ্রিজারেটরের কার্যসম্পাদন সহগ বের করা যাক।

সমাধান : প্রথমে একটি আদর্শ গ্যাসকে কার্যনির্বাহী বাহক ধরে কার্নো রেফ্রিজারেটরটি এবং সংশ্লিষ্ট PV ডায়াগ্রাম আঁকি।



কার্যসম্পাদন সহগের সংজ্ঞা অনুসারে এবং প্রথম সূত্র প্রয়োগ করে,

$$\beta_R = \frac{|Q_L|}{W_{in}} = \frac{|Q_L|}{|Q_H| - |Q_L|}$$

এখানে $|Q_L|$ এবং $|Q_H|$ প্রথম সূত্রের সাহায্যে মূল্যায়ন করা যায়। জুলের সূত্র অনুসারে $w = \int p dv$ এবং $PV = mRT$

$$|Q_L| = Q_{A-B} = mRT_L \log_e \frac{V_B}{V_A}$$

$$|Q_H| = Q_{\text{out, C-D}} = -Q_{C-D} = -mRT_H \log_e \frac{V_D}{V_C}$$

$$= mRT_H \log_e \frac{V_C}{V_D}$$

এটিও দেখানো যায় যে, $\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$

$$\text{অতএব, } \beta_R = \frac{mRT_L \log_e\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}{mRT_H \log_e\left(\frac{V_C}{V_D}\right) - mR\Gamma_L\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}$$

$$= \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

এখানে বলা প্রয়োজন যে, এটি কার্যদক্ষতার বিপরীতমুখী (reciprocal) নয়। বিভিন্ন তাপের β_R এর সংশ্লিষ্ট মান এবং কার্নোর কার্যদক্ষতা দেয়া হলো। লক্ষণীয় যে, β_R এবং η একটি অপরটির বিপরীতমুখী নয়।

T_L (K)	T_H (K)	β_R	η_{carnot}
–5	30	77	0.12
–5	20	10.7	0.085
–5	10	17.9	0.05
–50	20	3.2	0.24
–150	20	0.72	0.58
–250	20	0.085	0.92

৪.৪.৩ অন্যান্য প্রত্যাবর্তী চক্রসমূহ : কার্নো চক্রই একমাত্র প্রত্যাবর্তী হিট ইঞ্জিন চক্র নয়। স্টার্লিং (Stirling) এবং এরিকশান (Ericsson) নামে আরো দুটি চক্র রয়েছে। এ দুটি চক্র বিবেচনার দাবিদার এজন্য যে, উভয় চক্র কতকগুলো প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়ার সমষ্টি।

৪.৫ কার্নোর অনুসিদ্ধান্ত (The Carnot Corollaries)

তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্রের অনুসরণে অনেক মূল্যবান তথ্যে উপনীত হওয়া যায়। এখানে ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা এবং রেফ্রিজারেটরের হিট পাম্পের কার্যসম্পাদন সহগ সংক্রান্ত কিছু তথ্য উপস্থাপিত হলো। প্রায়ই এগুলোকে কার্নোর অনুসিদ্ধান্ত অথবা তথ্য বলা হয়। ইঞ্জিন সংক্রান্ত তত্ত্বগুলো হলো :

৪.৫.১ তাপের একই সীমারেখায় কার্যকর থেকে যে কোনো ইঞ্জিনের কার্য কোনো প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিনের কার্যদক্ষতার চেয়ে অধিক হবে না।

৪.৫.২ তাপের একই সীমারেখার মধ্যে কার্যকর থাকলে সকল প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা একই।

এখানে নির্দিষ্ট ব্যবস্থাটি যে দুটি শক্তির আধারের তাপের আদান প্রদান করে সে দুটি আধারের তাপের পার্থক্যকে চক্রের তাপ সীমারেখা বলা হয়েছে।

এই বক্তব্য দুটির যে কোনো একটির লঙ্ঘন যে দ্বিতীয় সূত্রের লংঘন বুঝায় তা দেখিয়ে বক্তব্য দুটি প্রমাণ করা যাক। ৫.১২ চিত্র অনুযায়ী যে কোনো একটি ইঞ্জিন X এবং অপরটি প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিন R একই তাপ সীমারেখার ভিতর চালু রয়েছে। প্রথম ধাপে মনে করা যাক যে X ইঞ্জিনের কর্মদক্ষতা R এর অধিক। অতএব একই পরিমাণের তাপ $|Q_H|$ উভয় ইঞ্জিনে সরবরাহের ফলে $W_x > W_R$ এবং $|Q_{LX}| < |Q_{LR}|$ এখন প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনকে বিপরীতভাবে অর্থাৎ রেফ্রিজারেটর হিসেবে চালানো যাক। বিপরীত ইঞ্জিন $|Q_H|$ পরিমাণ তাপ T_H আধারে বর্জন করছে এবং W_R পরিমাণ কাজ শোষণ করছে। যেহেতু $|W_R|$ পরিমাণ কাজ W_x এর চেয়ে কম সেহেতু X ইঞ্জিন পরিপার্শ্বের উপর কাজ করেও $(W_x - |W_R|)$ পরিমাণ কাজ রেফ্রিজারেটরে যোগান দিয়ে যাবে। বিপরীত ইঞ্জিন অর্থাৎ রেফ্রিজারেটরটি $|Q_H|$ পরিমাণ তাপ, T_H তাপমাত্রার আধারে বর্জন করছে এবং X ইঞ্জিন সেই পরিমাণ তাপ একই আধার থেকে গ্রহণ করছে। অতএব T_H তাপমাত্রার আধারের তাপ বিনিময়ের নিট মূল্য শূন্য। এ অবস্থায় তাপের আধারটি অপসারণ করে রেফ্রিজারেটরে তাপ সরাসরি X ইঞ্জিনে বর্জন করা যাবে। এখন এমন একটি ব্যবস্থার কথা চিন্তা করা যায় যাতে X ইঞ্জিন এবং রেফ্রিজারেটর একই সীমারেখায় আবদ্ধ (ভাঙ্গা লাইনে দেখানো)। একুনে ব্যাপারটিকে তাহলে কি বলা যায়? নতুন ব্যবস্থাটি এমন একটি চক্র যা যুগপৎভাবে T_L আধারের সাথে তাপ বিনিময় করে কাজ করে যাচ্ছে। পূর্বেই বলা হয়েছে যে কেলভিন প্ল্যাঙ্কের দ্বিতীয় সূত্র অনুসারে এটি সম্ভব নয়। এতে এটিই প্রমাণিত হলো যে মূল অনুমান $\eta_x > \eta_R$ ঠিক নয়। অতএব উপসংহার হলো তাপমাত্রার একই সীমারেখায় কার্যকর কোনো ইঞ্জিনের কার্যদক্ষতা প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিনের অধিক হতে পারে না।

কার্নোর দ্বিতীয় অনুসিদ্ধান্ত প্রমাণের জন্য মনে করা যাক যে দুটি ইঞ্জিনই প্রত্যাবর্তীয়। ধরা যাক যে তাদের কার্যদক্ষতা বিভিন্ন বলে একই পরিমাণ কাজের যোগান দিয়ে ভিন্ন পরিমাণ কাজ পাওয়া যাবে। এ অবস্থায় যে ইঞ্জিনটি কম কার্যক্ষমতা ধারণ করে তাকে বিপরীতমুখী অর্থাৎ তাকে রেফ্রিজারেটররূপে চালানো যাক। অধিকতর কার্যদক্ষতা সম্পন্ন ইঞ্জিনটি একটি আধার থেকে নিট পরিমাণ তাপ শোষণ করে রেফ্রিজারেটরটিকে চালিয়েও এর উৎপাদিত কাজ উদ্বৃত্ত হবে। এটিও দ্বিতীয় সূত্রের সিদ্ধান্তের হুবহু একইরূপ লঙ্ঘন। অতএব সম্ভাব্য উপসংহার শুধু একটি হতে পারে। তাহলো দুটি প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিন তাপমাত্রার একই সীমারেখায় চালু থেকে তাদের কার্যদক্ষতা একই।

উপসংহার : তাপমাত্রার একই সীমারেখার মধ্যে কার্যকর থাকলে সকল প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিনের কার্যদক্ষতা অবশ্যই অভিন্ন হবে। এই উপসংহারটির অর্থ এই দাঁড়ালো যে যদি কোনো একটি প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিন যা কোনো একটি নির্দিষ্ট বস্তুর উপর এবং নির্দিষ্ট তাপমাত্রার সীমারেখার মধ্যে কাজ করছে সেটির কার্যদক্ষতা নির্ধারণ করা যায় তাহলে একই সমীকরণ সমস্ত প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিনে প্রয়োগ করা যাবে।

ইতোমধ্যে উদাহরণ ৪.৪.২.১ তে দেখানো হয়েছে যে একটি কার্যনির্বাহী আদর্শ গ্যাসের দ্বারা কার্য সম্পাদনকারী একটি কার্নো ইঞ্জিনের কার্যদক্ষতা T_H এবং T_L আধারের তাপমাত্রার মধ্যে কার্যকর হলে তা

$$\eta = 1 - (T_L/T_H)$$

কার্নোর দ্বিতীয় অনুসিদ্ধান্ত অনুসারে কার্যদক্ষতার এই সমীকরণটি যে কোনো প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিনে প্রয়োগ করা যায়। রেফ্রিজারেটর এর জন্য কার্নো অনুসিদ্ধান্তগুলো নিম্নরূপ :

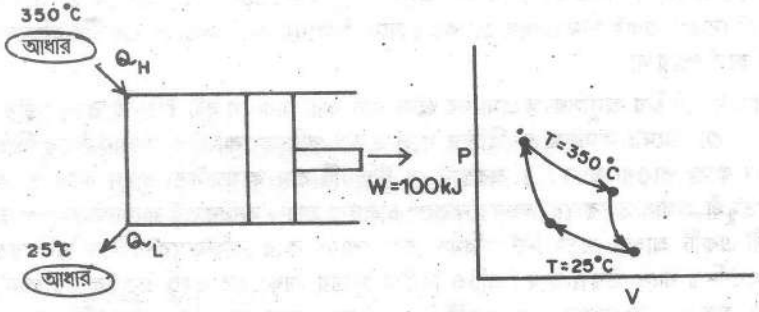
১. তাপের একই সীমারেখার মধ্যে কার্যকর থাকলে যে কোনো রেফ্রিজারেটর এর কার্যসম্পাদন সহগ প্রত্যাবর্তীয় রেফ্রিজারেটর এর অধিক হবে না।

২. তাপের একই সীমারেখায় কার্যকর থাকলে সমস্ত প্রত্যাবর্তীয় রেফ্রিজারেটর এর কার্যসম্পাদন সহগ একই হবে।

এই অনুসিদ্ধান্তগুলোর প্রমাণ ও ইঞ্জিনের ক্ষেত্রে যে প্রমাণ দেখানো হয়েছে তার অনুরূপ। উল্লেখ্য যে, দুটি শক্তির আধারের তাপের উপর নির্ভরশীল প্রত্যাবর্তীয় রেফিজারেটরের যে কার্যসম্পাদন সহগের সমীকরণ বের করা হয়েছে তা সকল প্রত্যাবর্তীয় রেফ্রিজারেটরের জন্যও প্রযোজ্য। অতএব এটি যে কোনো প্রত্যাবর্তীয় রেফ্রিজারেটরের জন্যও সমানভাবে প্রযোজ্য।

কার্নো ইঞ্জিন এবং কার্নো রেফ্রিজারেটরের দুটি উদাহরণ নিচে দেয়া হলো :

১. এমন একটি কার্নো ইঞ্জিনের কার্যদক্ষতা নির্ণয় করি যা 350°C এবং 25°C তাপে কার্যকর থেকে 100 kJ পরিমাণ কাজ উৎপাদন করে।



সমাধান : প্রথম সূত্র প্রয়োগ করে,

$$|Q_H| - |Q_L| = W$$

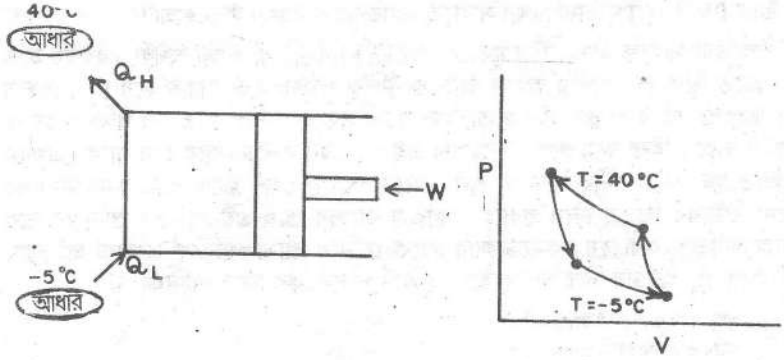
এবং
$$\frac{|Q_H|}{|Q_L|} = \frac{T_H}{T_L}$$

$|Q_H|$ এর মান বের করে $|Q_H| - |Q_H|\left(\frac{T_L}{T_H}\right) = W$

$\therefore$
$$|Q_H| = \frac{W}{1 - \frac{T_L}{T_H}} = \frac{100}{1 - \frac{298}{623}} = 192 \text{ kJ}$$

$$\eta = \frac{100}{192} \times 100 = 52\%$$

২. এমন একটি কার্নো রেফ্রিজারেটর চালাবার শক্তি নির্ণয় করি যা 40°C এবং –5°C তাপে কার্যকর থেকে প্রতি মিনিটে 100 kJ তাপ অপসারণ করে।



সমাধান : রেফ্রিজারেটরটি চালাবার প্রয়োজনীয় শক্তি তাপ শোষণ এবং তাপ অপসারণের হারের তারতম্য থেকে নির্ধারণ করা যায়।

$$|Q_H| = |Q_L| \frac{T_H}{T_L} = 100 \left(\frac{313}{268}\right) = 117 \text{ kJ/min}$$

$$\therefore \quad W_{in} = |Q_H| - |Q_L| = 117 - 100 = 17 \text{ kJ/min} = 28 \text{ kW}$$

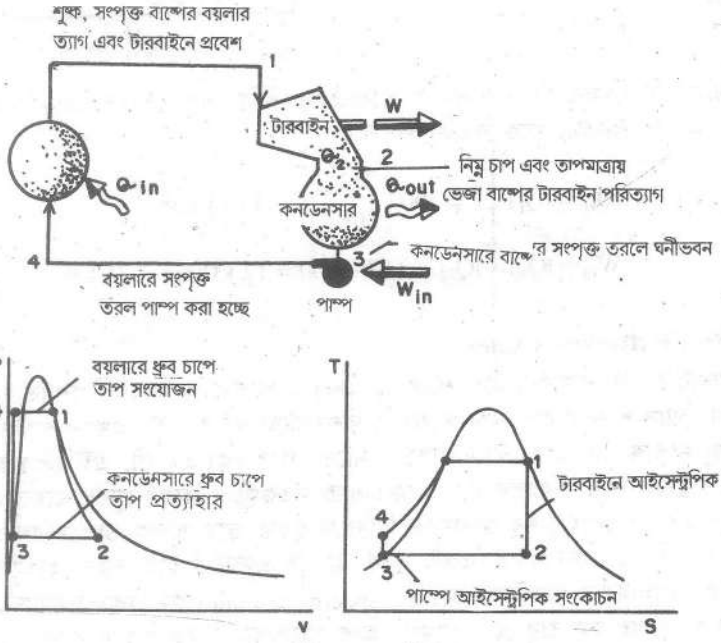
৪.৬ র‍্যাঙ্কিন চক্র (Rankine Cycle)

তাপগতিবিদ্যার বহুবিধ প্রয়োগের মধ্যে শক্তি (power) উৎপাদনে এর প্রয়োগ বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য। গ্যাস শক্তি ব্যবস্থা সম্বন্ধে অন্যত্র বিশদভাবে বলা হয়েছে। এখানে বাষ্পীয় শক্তি ব্যবস্থা সম্বন্ধে বলা হবে। গ্যাস ব্যবস্থার সাথে এর পার্থক্য এই যে, এই ব্যবস্থায় কার্যনির্বাহী বস্তুটির দশার পরিবর্তন হয়ে থাকে। এতে কতকগুলো বিশেষ সুবিধা রয়েছে। প্রথমত– দশার পরিবর্তনহেতু শুধু সেনসিবল হিটিং প্রক্রিয়ার চেয়ে অধিক তাপ সংরক্ষণ করা সম্ভব। দ্বিতীয়ত– কার্যনির্বাহী বস্তুটি বাষ্প হিসেবে প্রসারিত হয়ে তরল হিসেবে সংকুচিত হয়। তরল দশার আপেক্ষিক আয়তন (specific volume) কম বিধায় প্রসারণের ফলে যে কাজ সম্পন্ন হয় তার অতি সামান্য অংশ সংকোচনে ব্যবহৃত হয়ে থাকে। এ কারণেই কার্যকর গ্যাস চক্রের উন্নয়নের অনেক আগে থেকেই বাষ্পীয় চক্র ব্যবহৃত হয়ে আসছে। সবচেয়ে ব্যবহৃত কার্যবাহকটি হলো পানি। যদিও এই চক্রের অংশবিশেষে পানি তরল অবস্থায় থাকে তথাপি চক্রটি বাষ্প চক্র (steam cycle) এবং বাষ্প প্লান্ট হিসেবে পরিচিত।

আসলে সারা পৃথিবীতে যে পরিমাণ বিদ্যুৎ উৎপাদিত হয় তার সিংহভাগ স্টিম প্লান্টে উৎপাদিত হয়ে থাকে। এছাড়া বাসগৃহ গরম রাখার জন্য, পানি গরমের জন্য এবং অন্যান্য

অনেক শিল্প প্রক্রিয়ায়ও স্টিম ব্যবহৃত হয়ে থাকে। কার্নো চক্র সর্বোচ্চ কার্যদক্ষতা সম্পন্ন হওয়া সত্ত্বেও কার্যনির্বাহী বস্তুর দশা পরিবর্তন ও প্রক্রিয়াজাত অন্যান্য অসুবিধার জন্য স্টিম চক্রের জন্য কার্নো চক্র উপযুক্ত বলে বিবেচিত হয় না। প্রাসঙ্গিক বিবেচনায় র‍্যাঙ্কিন (Rankine Cycle) চক্র আদর্শ হিসেবে অধিক উপযোগী। আসলে তাপের আধার প্রচলিত জ্বালানি দহনের চুল্লি অথবা পাওয়ার রিয়াক্টর যাই হোক না কেন স্টিম চক্র মূলত অভিন্ন। ৪.৬ চিত্রে PV এবং TS ডায়াগ্রামের সাহায্যে র‍্যাঙ্কিন চক্র ব্যাখ্যা করা হলো।

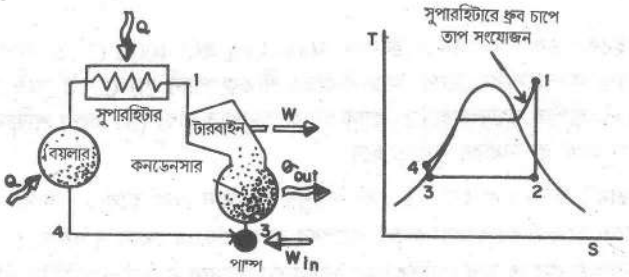
শুষ্ক এবং সংপৃক্ত বাষ্প প্রাইম মুভারে (Prime Mover) যা ইঞ্জিন অথবা টারবাইন হতে পারে তাতে ঢুকে রুদ্ধতাপীয় অথবা আইসেনট্রপিক প্রক্রিয়ায় প্রসারিত হয়ে P_2 অবস্থায় যায়। অত:পর এই বাষ্প ধ্রুব চাপ ও তাপমাত্রায় ঘনীভূত হয়ে সংপৃক্ত তরলে পরিণত হয় যা অবস্থা 3 দ্বারা চিহ্নিত করা হয়েছে। বাষ্পের এই ঘনীভবন কনডেনসারে হয়ে থাকে। এখানে সাধারণত হ্রদ অথবা নদীর পানি বা অন্য কোনো পানির উৎস থেকে পানি কনডেনসারের অসংখ্য টিউবের ভিতর দিয়ে প্রবাহিত করিয়ে বাষ্পের তাপ এই পানিতে স্থানান্তর হয়ে বাষ্পকে ঘনীভূত করা হয়। কনডেনসার থেকে বেরিয়ে আসা পানিকে সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় পাম্প করে P_4 অবস্থায় নিয়ে যাওয়া হয়। এখানে প্রথমে ধ্রুব চাপে পানিকে গরম



চিত্র ৪.৬ : র‍্যাঙ্কিন চক্র।

করে প্রথমে সংপৃক্ত তাপমাত্রায় (Saturated temperature) নিয়ে বাষ্পে পরিণত করে অবস্থা 1 এ নেয়া হয়। এভাবেই চক্রটি সম্পূর্ণ হলো। অবস্থা 3 থেকে 4 এর রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় তাপমাত্রার যে পরিবর্তন হয় তা অতি সামান্য। তবে চক্রটি অনুধাবনের সুবিধার্থে TS ডায়াগ্রামে তা কিছুটা অতিরঞ্জিত করে দেখানো হয়েছে।

যেহেতু কার্যদক্ষতা বৃদ্ধির জন্য উচ্চ তাপমাত্রার প্রয়োজন, সেহেতু সর্বোচ্চ চাপের সীমা অতিক্রম না করেও উচ্চ তাপমাত্রা ব্যবহার সম্ভব। এটি হলো বয়লার থেকে সংপৃক্ত বাষ্প সুপারহিটারে ধ্রুব চাপে উত্তাপিত করা। ৪.৭ চিত্রে সমস্ত প্রক্রিয়াটি ব্যাখ্যা করা হয়েছে। বয়লার এবং সুপারহিটার এর দুটিকে এক সাথে বাষ্প উৎপাদক বলা হয়। চিত্র ৪.৬ এবং ৪.৭ এর তুলনা করলে দেখা যায় যে চাপের নির্ধারিত সীমারেখায় থেকেও সুপারহিটার দ্বারা তাপীয় কার্যদক্ষতা বাড়ানো যায়। TS ডায়াগ্রাম থেকে এটিই প্রতীয়মান হবে যে নির্ধারিত তাপমাত্রার সীমারেখার মধ্যে র‍্যাঙ্কিন চক্রের কার্যদক্ষতা সর্বদা কার্নোর কার্যদক্ষতার চেয়ে কম। এর কারণ এই যে, প্রথমোক্ত চক্রের মোট তাপ সর্বোচ্চ তাপে যোগ হয় না।



চিত্র ৪.৭ : অতিতাপিত র‍্যাঙ্কিন চক্র।

র‍্যাঙ্কিন চক্রের কার্যকারিতা নিরূপণ খুব কঠিন নয়। কারণ তার দুটি তাপ স্থানান্তর প্রক্রিয়ায় কোনো কাজ সম্পাদন হয় না আর যে দুটি প্রক্রিয়ায় কাজ সম্পাদিত হয় সে দুটি রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া। তাছাড়া চক্রটিতে সম্ভাব্য শক্তি (Potential energy) ও গতিশক্তির (Kinetic energy) কোনো পরিবর্তন ধর্তব্য নয়। সংশ্লিষ্ট যন্ত্রসমূহের কথা বিবেচনায় এনে প্রথম সূত্র প্রয়োগ করে,

স্টিম জেনারেটর	:	$q_{4-1} = h_1 - h_4$	$(p_1 = p_4)$
টারবাইন	:	$W_T = h_1 - h_2$	$(s_2 = s_1)$
কনডেনসার	:	$q_{out\ 2-3} = h_3 - h_2$	$(p_3 = p_2 ; h_3 = h_f)$
পাম্প	:	$W_{in.\ p} = h_4 - h_3$	$(s_4 = s_3)$

চক্র এর কার্যদক্ষতা,

$$\eta = \frac{W}{q_{4-1}} = \frac{W_T - W_{in.p}}{q_{4-1}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

আদর্শ র‍্যাঙ্কিন চক্রের অবস্থা 4 এর P_4 এবং S_4 সহজেই জানা যায়। কিন্তু কোনো সারণি, চার্ট অথবা কম্পিউটার প্রোগ্রাম থেকে P এবং S এর মান থেকে এনথালপি h বের করা কঠিন। তবে রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় এনথালপির পরিবর্তন এভাবে বের করা যায়।

$$\Delta h = \int v dp$$

এটিকে আরো সহজে $\int vdp = \int v\Delta p$ লেখা যায়। এরূপ অনুমান সঠিক এজন্য যে, পানির আপেক্ষিক আয়তন এর চাপের উপর নির্ভরশীল নয় বললেই চলে।

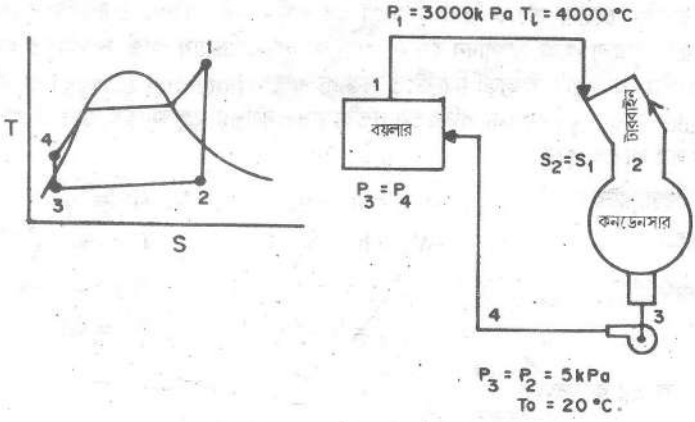
অন্যান্য শক্তি চক্রের মধ্যে র‍্যাঙ্কিন চক্রের আর একটি সুবিধা এই যে, এর পশ্চাৎপদ কাজের (Back work ratio) অনুপাত অনেক কম।

পশ্চাৎপদ কাজের অনুপাত $= (W_{in.\,p})/(W_T)$

র‍্যাঙ্কিন চক্রের মধ্যে পাইপে চাপের পতন, নানা দিকের তাপের অপচয়, টারবাইন এবং পাম্পের কার্যদক্ষতা যা সর্বদাই একের চেয়ে কম হয়ে থাকে এগুলো বাষ্প চক্রের বিশ্লেষণে সহজেই পুষিয়ে নেয়া যায়।

উদাহরণ : একটি র‍্যাঙ্কিন চক্রে বাষ্প 3000 kPa এবং 4000°C তে টারবাইনে প্রবেশ করে 5 kPa কমপ্রেসরের চাপে কাজ করছে। শীতক পানি 20°C তে পাওয়া যাচ্ছে। এ অবস্থায় (1) তাপীয় কর্মদক্ষতা (2) ব্যাকওয়ার্ক অনুপাত এবং (3) প্রাপ্য শক্তির কত অংশ কাজে যোগ হচ্ছে তা নির্ধারণ করতে হবে।

সমাধান : চিত্রে প্রবাহের চিত্র এবং সংশ্লিষ্ট মূল্যমান দেয়া হয়েছে। তাপীয় কার্যদক্ষতা নির্ণয় করতে হলে টারবাইনের কাজ, পাম্পের কাজ এবং 4 থেকে 1পর্যন্ত তাপ যোগানের পরিমাণ নির্ধারণ করতে হবে। গতিশক্তির পরিবর্তন হিসেবে না নিলে প্রতিটির পরিমাণ নির্ণয় সম্ভব।



$$\Delta h_p = h_4 - h_3 = \int_3^4 vdp = v\,(p_4 - p_3) = 0.001005\,(3000 - 5) = 3.0\ kJ/kg$$

$h_4 = h_3 + \Delta h_p = 137.8 + 3.0 = 140.8\ kJ/kg$

h_2 এভাবে পাওয়া যায় : $k_2 = 5kP_a$ এবং এনট্রপি $s_2 = s_1 = 6.921\ kJ/kgK$

$$x_2 = \frac{s_2 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.921 - 0.4763}{7.9129} = 0.814$$

$$h_2 = h_f + x_2 h_{fg} = 137.8 + 0.814\,(2422.5) = 2110.1 \text{ kJ/kg}$$

এই মান Mollier Diagram থেকেও বের করা যায়। সমস্ত মান নির্ধারণ করে

(1) $$\eta = \frac{W}{q_{4-1}} = \frac{W_T - W_{in.p}}{q_{4-1}} = \frac{h_1 - h_2 - \Delta h_p}{h_1 - h_4}$$

$$= \frac{3230.7 - 2110.1 - 3.0}{3230.7 - 140.8} = \frac{1121 - 3}{3090} \doteq 0.362$$

(2) $$\text{Back work ratio} = \frac{W_{in.p}}{W_T} = \frac{\Delta h_p}{h_1 - h_2} = \frac{3}{1121} = 0.0027$$

(3) $$q_{av} = q - q_{unav} = q - T_0 (s_1 - s_f) = 3090 - 293\,(6.921 - 0.4763)$$

$$\doteq 1200 \text{ kJ/kg}$$

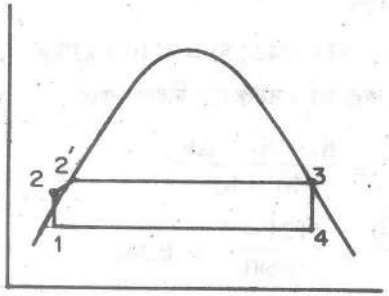
$$\therefore \quad \frac{q_{av}}{q} = \frac{1200}{3090} = 0.388$$

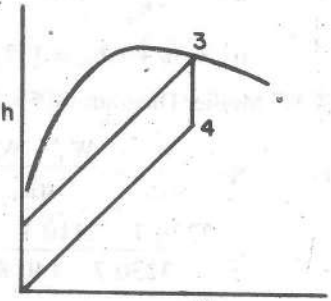
মন্তব্য : গ্যাস টারবাইন চক্রের তুলনায় এই ব্যাক ওয়ার্ক অনুপাত লক্ষণীয়ভাবে অনেক কম।

৪.৬.১ র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা বৃদ্ধির উপায় : আদর্শ র‍্যাঙ্কিন চক্র কার্যদক্ষতায় কার্নো চক্রের প্রায় কাছাকাছি হলেও প্রকৃত র‍্যাঙ্কিন চক্রের ক্ষেত্রে তা প্রযোজ্য নয়। প্রকৃত ইঞ্জিনে প্রধানত টারবাইন এবং পাম্পে অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া বিদ্যমান। আসলে একটি পাওয়ার প্লান্টের দক্ষতা নির্ধারণ করার জন্য বয়লারে কতটুকু জ্বালানি পুড়িয়ে কি পরিমাণ বিদ্যুৎ উৎপন্ন হলো তা পরিমাপ করা দরকার। এখানে চক্রটির কার্যনির্বাহী ফ্লুইডে পাম্পের সাহায্যে কতটুকু শক্তি যোগ হলো তা ধর্তব্য নয়। এরূপভাবে নির্ণীত প্লান্টের সার্বিক দক্ষতাকে তাপের হার (heat rate) যা প্রতি কিলোওয়াট বিদ্যুৎ উৎপাদনে কত কিলোজুল তাপ ব্যবহার করা হলো তা নির্দেশ করে। অপরদিকে সার্বিক দক্ষতা চক্রের দক্ষতার চেয়ে অনেক কম। একটি র‍্যাঙ্কিন চক্রের PV ডায়াগ্রাম পর্যালোচনা করলে দেখা যাবে যে এতে বেশ কিছু পরিবর্তন এনে চক্রের দক্ষতা বাড়ানো যায়। চক্রের চাপ বাড়ালে ডায়াগ্রামের যে আয়তক্ষেত্র কাজের পরিমাণ নির্দেশ করে তা বাড়ানো যায়। দ্বিতীয়ত বাষ্পকে অতিতাপিত করে যা পূর্বেই বলা হয়েছে। তৃতীয়ত টারবাইনে প্রসারিত বাষ্পকে পুনরায় তাপিত করা। চতুর্থত বাষ্পকে রিজেনারেশন পদ্ধতিতে তাপিত করা। এর প্রতিটির বিস্তারিত পরবর্তী অনুচ্ছেদগুলোতে উদাহরণ এর সাহায্যে আলোচিত হলো।

উদাহরণ ১ : একটি র‍্যাঙ্কিন ইঞ্জিন 20°C (2.34 kPa) এবং 100°C (101.32 kPa) এ চালু আছে। এর দক্ষতা নির্ণয় করে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতার সাথে তুলনা করতে হবে।

T–s এবং h–s ডায়াগ্রামে এভাবে দেখানো যায়,





সংশ্লিষ্ট ধর্মগুলো নিম্নলিখিতভাবে দেখানো হলো :

অবস্থান	P kPa	T°C	vm^3/kg	h kJ/kg	S, kJ/kg.K	x
1	2.34	20	0.001002	83.835	0.2962	0.0
2	101.32	–	–	–	S_1	0.0
2′	101.32	100	0.001043	419.06	1.3069	0.0
3	101.32	100	1.6736	2675.7	7.3545	1.0
4	2.34	20	–	–	S_3	–

আদর্শ টারবাইনের কাজ, $W_{3-4} = h_3 - h_4$

এখানে h_4 জানা নেই। h_4 জানতে হলে প্রথমে বাষ্পের গুণ অর্থাৎ x জানতে হবে নিম্নলিখিত সম্পর্ক থেকে,

$$s_4 = s_f + x_4 s_{fg}$$

$$7.3545 = 0.2962 + x_4 \times 8.4027$$

$$\therefore \quad x_4 = \frac{7.3545 - 0.2962}{8.4027} = 0.84$$

$$h_4 = h_{f.4} + x_4 h_{fg.4} = 83.835 + 0.84 \times 2591.9 = 2261.03 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{3-4} = h_3 - h_4 = 2675.7 - 2261.03 = 414.67 \text{ kJ/kg}$$

Work done by pump $= v_1 (P_2 - P_1) = 0.001002 (101.32 - 2.34)$

$= 0.0992$ kJ/kg

$$\therefore \quad h_2 = h_1 - W_{3-4} = (83.835 - 0.0992) = 83.74 \text{ kJ/kg}$$

2–2′ তে তাপ স্থানান্তরের পরিমাণ $= 419.06 - 83.74 = 335.32$ kJ/kg

চক্রটিতে মোট তাপ সরবরাহের পরিমাণ হলো 2 থেকে 2′ পর্যন্ত এবং এই সংপৃক্ত অবস্থা থেকে অর্থাৎ 2′ থেকে 3 পর্যন্ত বাষ্পীভূত করার তাপ

$$\therefore \quad q_{2-3} = q_{2-2'} + q_{2'-3} = 335.32 + T_{2'}(s_3 - s_{2'})$$
$$= 335.32 + 373\,(7.3545 - 1.3069)$$
$$= 2592.82 \text{ kJ/kg}$$

q_{2-3} এভাবেও বের করা যায়

$$q_{2-3} = h_3 - h_2 = 2675.7 - 83.74 = 2591.96 \text{ kJ/kg}$$

অতএব চক্রের দক্ষতা $\eta = \dfrac{W_{3-4} - W_{1-2}}{q_{2-3}} = \dfrac{414.67 - 0.0992}{2592.82} = 16\%$

কার্নো দক্ষতা $= 1 - \dfrac{293}{373} = 21.4\%$

উদাহরণ ২ : উল্লিখিত উদাহরণে যদি পাম্পের দক্ষতা 60% এবং টারবাইন দক্ষতা 70% হয় তাহলে চক্রের দক্ষতা নির্ণয় করতে হবে।

দক্ষতা 70% ধরলে টারবাইন এর প্রকৃত কাজ $= 0.7 \times W_{3-4}$

$$= 0.7 \times 414.17$$
$$= 290.27 \text{ kJ/kg}$$

এবং পাম্পের কাজ $0.992/0.6 = 0.165$ kJ/kg

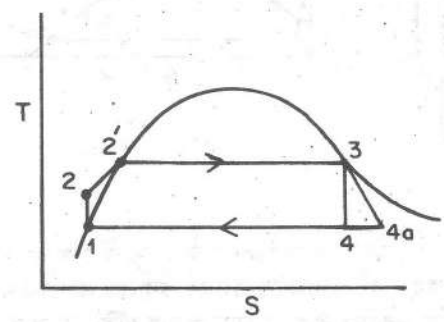
$h_4 = h_3 - w_{3-4} = 2675.7 - 290.27 = 2385.43$ kJ/kg

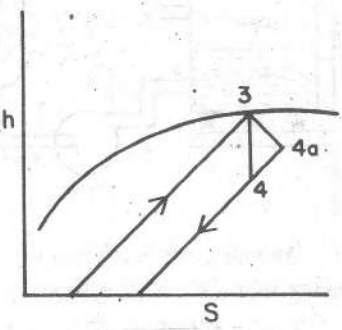
বাষ্পের গুণ অর্থাৎ নতুন x_4 ধরে

$$h_4 = h_{1.4} + x_4 h_{lg.4} = 83.835 + x_4 \times 2453.4$$

$$\therefore \quad x_4 = (2385.43 - 83.835)/2453.4 = 0.94$$

এখন $h_2 = h_1 + w_{1-2} = 83.835 + 0.165 = 84$ kJ/kg





$$\text{চক্রের দক্ষতা} = \frac{290.27 - 0.165}{2592.82} = 11.2\%$$

উদাহরণ ৩ : প্রথম উদাহরণে চাপ 101.32 থেকে 4000 kPa এ উন্নীত করলে

$w_{3-4} = 717.1$ kJ/kg

$q_{2-2'} = 996.7$ kJ/kg

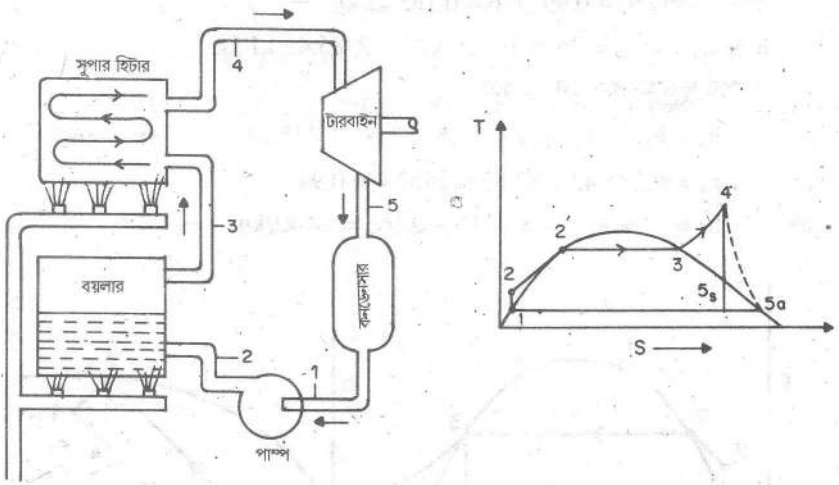
$9_{2'-3} = 1713.4$ kJ/kg

পাম্পের কাজ $W_{1-2} = 6.7$ kJ/kg এবং $x_4 = 0.8151$

$$\therefore \quad \text{চক্রের দক্ষতা} \quad \eta_R = \frac{717.1 - 6.7}{996.7 + 1713.4} = 26.2\%$$

$$\text{সংশ্লিষ্ট কার্নো দক্ষতা} \quad \eta_c = 1 - \frac{(20 + 273)}{(250.3 + 273)} = 44\%$$

লক্ষ্য করার বিষয় এই যে, 4000 kPa চাপে র‍্যাঙ্কিন ইঞ্জিনের দক্ষতা কার্নো ইঞ্জিনের 59.5%। অতএব 101.32 kPa থেকে 4000 kPa চাপে র‍্যাঙ্কিন কার্যদক্ষতা 16% থেকে 26.2% এ উন্নীত হয়েছে। কিন্তু কার্নোর দক্ষতার তুলনায় র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা তেমন বাড়েনি। এর কারণ হলো এই যে উচ্চ চাপের ক্ষেত্রে নিম্ন চাপের তুলনায় সিংহভাগ তাপ যোগ হয়েছে নিম্ন তাপে। আর নিম্ন চাপের ক্ষেত্রে সিংহভাগ তাপ যোগ হয়েছে ধ্রুব উচ্চ তাপে।



উদাহরণ ৪ : র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা বাড়ানোর উপায় হলো বয়লার থেকে বাষ্প বেরিয়ে আসার সময় এই বাষ্পকে অতিতাপিত করা। এটি সাধারণত এভাবে করা হয় যে উল্লিখিত বাষ্পকে এমন কতকগুলো টিউবের সাহায্যে প্রবাহিত করা যা অন্য কোনো শক্তির উৎস দ্বারা

বয়লারের সংপৃক্ত তাপমাত্রার চেয়ে অধিক তাপমাত্রার তাপিত হবে। ফলে উদ্দিষ্ট বাষ্প সাধারণ র‍্যাঙ্কিন চক্রের বাষ্প থেকে অধিক তাপমাত্রায় অধিক এনথালপিসহ টারবাইনে প্রবেশ করবে। বয়লার থেকে বের হয়ে আসা বাষ্পকে অতিতাপিত করলে টারবাইনে প্রসারিত বাষ্প যা টারবাইন থেকে বেরিয়ে আসবে তার গুণগত মান সাধারণ র‍্যাঙ্কিন চক্র থেকে অধিক হবে।

প্রথম উদাহরণে উল্লিখিত চক্রের বাষ্পকে 400°C এ তাপিত করে সংশ্লিষ্ট ধর্মগুলো নিচে দেয়া গেল এবং চক্রটি T–S ডায়াগ্রামে 1 থেকে 5 পর্যন্ত দেখানো হলো :

অবস্থান	P kPa	T°C	vm^3/kg	h kJ/kg	SkJ/kg.K	x
1	2.34	20	0.001002	83.835	0.2962	0.0
2′	4000	250.4	0.001252	1087.2	2.7962	0.0
3	4000	250.4	0.04977	2800.6	6.0689	1.0
4	4000	400	0.07340	3213.4	6.7688	–
5s	2.34	20	–	1981.3	54	0.7734
5a	2.34	20	–	2350.9	–	0.9241

নতুন অবস্থায়,

$w_{4-5} = 862.5$ kJ/kg

$q_{2-2'} = 996.7$ kJ/kg

$q_{2'-3} = 1713.4$ kJ/kg

$q_{3-4} = 412.8$ kJ/kg

$w_{1-2} = -6.7$ kJ/kg

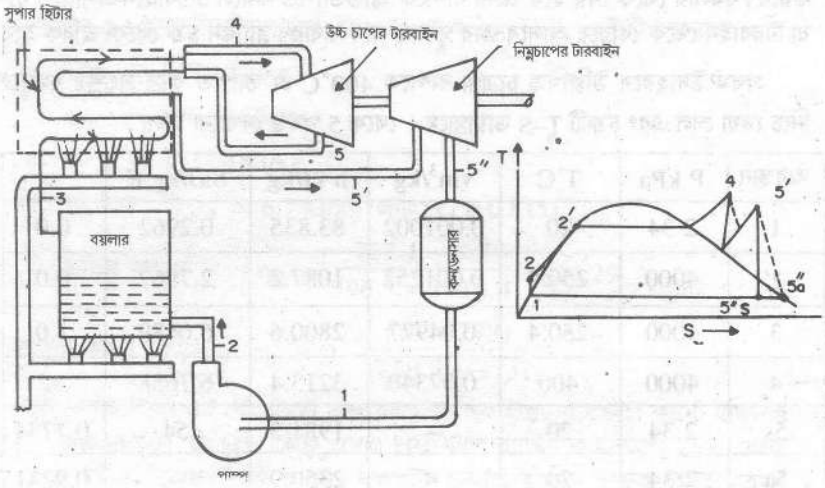
$x_{5,a} = 0.92$

ফলে চক্রের দক্ষতা দাঁড়ায় $= \dfrac{862.5 - 6.7}{996.7 + 1713.4 + 412.8} = 27.4\%$

একই চক্র অতিতাপিত না হলে দক্ষতা হতো 26%। কার্নো চক্রের দক্ষতা দাঁড়ায় $= 1 - \dfrac{(20 + 273)}{(400 + 273)} = 56.5\%$

অর্থাৎ অতিতাপিত র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা কার্নোর দক্ষতার $(27.4/56.5) \times 100 = 48.5\%$। অবস্থান 5 এ বাষ্পের গুণগত মান এসে দাঁড়িয়েছে 92% এ। অথচ অতিতাপিত না হলে টারবাইনে প্রসারিত হওয়ার পর বাষ্পের গুণগত মান ছিল 84%। প্রায়োগিক ক্ষেত্রে এর উপযোগিতা অনেক বেশি।

উদাহরণ ৫ : র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা আরো বাড়ানো যায় যদি টারবাইনে প্রসারিত বাষ্পকে পুনরায় তাপিত করা যায়। সহজভাবে নিচের চিত্রের সাহায্যে তা দেখানো হলো।



উচ্চ চাপের টারবাইনে বাষ্প প্রসারিত হওয়ার পর পুনরায় একে তাপিত করে নিম্ন চাপের টারবাইনে চূড়ান্তভাবে প্রসারিত করা হয়। একে দুই ধাপের টারবাইন বলে। পুন:-তাপিত করার সুবিধা এই যে প্রতিটি ধাপে বাষ্পের গুণগত মান বেশি রাখা যায় এবং বয়লারের চাপও অধিক রাখা যায়।

অবস্থান	P kPa	T°C	v m^3/kg	h kJ/kg	S kJ/kg.K	x
1	2.34	20	(0.001002)	(83.835)	0.2962	0.0
2′	4000	(250.4)	(0.001252)	(1087.2)	2.7962	0.0
3	4000	(250.4)	(0.04977)	(2800.6)	6.0689	1.0
4	4000	400	(0.07340)	(3213.4)	6.7688	–
5s	1000	–	–	(2865.0)	S_4	–
5a	1000	–	–	(2969.5)	6.9739	–
5′	1000	400	–	(3263.8)	7.4648	–
5″s	(2.34)	20	–	(2185.4)	$5_{5'}$	0.8566
5″a	(2.34)	20	–	(2508.9)	–	0.9885

বাষ্পের ধর্মগুলো উপরের সারণিতে দেখানো হলো।

আইসেনট্রপিক প্রক্রিয়ায় 5 এর অবস্থান জানা যাবে। টারবাইন এর কার্যদক্ষতার সাহায্যে অন্যান্য অবস্থানগুলো যেমন 5_s, 5_a, $5'$, $5''_s$ ইত্যাদি বের করা যাবে।

5 এর চাপ 1000 kPa এবং $5_{5,s} = 6.7688$ kJ/kgK

$$\therefore \quad h_{s.s} = \frac{6.7688 - 6.6932}{6.9235 - 6.6932} \times 2941.9 + 2827.4 = 2865.0 \text{ kJ/kg}$$

এবং $w_{4-5,s} = 348.4$ kJ/kg। 70% টারবাইন এর দক্ষতা ধরে টারবাইনের প্রকৃত কাজ = 243.9 kJ/kg। অতএব উচ্চ চাপের টারবাইনের বহির্গমন এবং অবস্থানগুলো, $h_{5,a} = 2969.5$ kJ/kg এবং $S_{5,a} = 6.9731$ kJ/kg উপরের সারণিতে দেখানো হয়েছে।

$5_{a-5'}$ এর লাইন বরাবর 400°C এ তাপিত করতে হলে তাপ স্থানান্তরের পরিমাণ দাঁড়াচ্ছে,

$$q_{5-5'} = h_{5'} - h_{s,a} = 3263.8 - 2969.5 = 294.3 \text{ kJ/kg}$$

এভাবে টারবাইনের দক্ষতা ধরে 5″ এর অবস্থান বের করা যাবে। নিম্নচাপের টারবাইনে প্রকৃত কাজ হলো $w_{5'} - 5'' = 754.9$ kJ/kg

সুতরাং
$$W_{4-5} = 243.9 \text{ kJ/kg}$$
$$W_{5'-5''} = 754.9 \text{ kJ/kg}$$
$$q_{2-2'} = 996.7 \text{ kJ/kg}$$
$$q_{2-3} = 1713.4 \text{ kJ/kg}$$
$$q_{3-4} = 412.8 \text{ kJ/kg}$$
$$q_{5-5'} = 294.4 \text{ kJ/kg}$$
$$w_{1-2} = -6.7 \text{ kJ/kg} \text{ এবং } x_{5'',a} = 0.9885 \text{ kJ/kg}$$

টারবাইনের যৌথ কাজ $(243.9 + 754.9) = 998.8$ kJ/kg

$$\text{চক্রের দক্ষতা} = \frac{W_{4-5} + W_{5'-5''} + W_{1-2}}{q_{2-2'} + q_{2'-3} + q_{3-4} + q_{5-5'}}$$

$$= \frac{243.9 + 754.9 - 6.7}{996.7 + 1713.4 + 412.8 + 294.3}$$

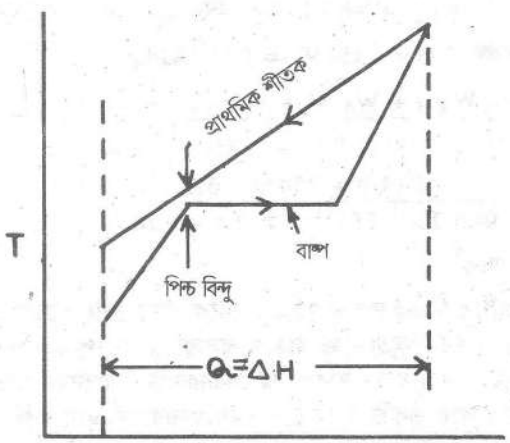
$$= 29\%$$

সুতরাং পুন:তাপিত চক্রের দক্ষতা 27.4% থেকে বেড়ে 29% হয়েছে যা কার্নো চক্রের দক্ষতার 51.3%। চক্রের দক্ষতা বৃদ্ধি ছাড়াও প্রসারণের পর পুন:তাপিত করার আরো অনেক সুবিধা রয়েছে। সবচেয়ে বড় সুবিধা এই যে টারবাইন সিস্টেমের প্রতি ধাপের চাপের রেঞ্জ কম রাখা যায়। ফলে একটি টারবাইনে সমগ্র প্রসারণের জন্য অধিক দক্ষতার জন্য নকশা প্রণয়ন না করে প্রতিটি টারবাইনের মধ্যে উচ্চ দক্ষতা পাওয়া সম্ভব। বড় বড় পাওয়ার স্টেশনে বহু ধাপের টারবাইন ব্যবহার করে পুন:তাপের মাধ্যমে টারবাইন এবং চক্র উভয়ের

দক্ষতা বৃদ্ধি করা যায়। ফলে যান্ত্রিক ভার টারবাইন শ্যাফটের এক জায়গায় কেন্দ্রীভূত না করে সুবিধাজনকভাবে বিভিন্ন অবস্থানে বিতরণ সম্ভব। দশম অধ্যায়েও র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা বৃদ্ধির আরও বিশেষ কিছু পদ্ধতি সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে।

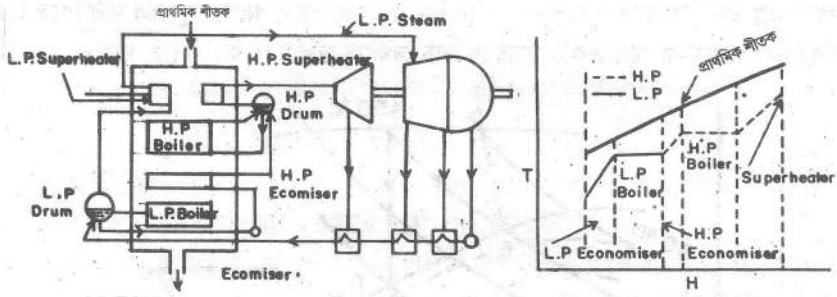
৪.৭ পারমাণবিক চুল্লিতে (Nuclear Reactor) র‍্যাঙ্কিন চক্রের ব্যবহার

যেসব পারমাণবিক চুল্লি (Nuclear Reactor) বিদ্যুৎ উৎপাদনের জন্য নিয়োজিত সেগুলিকে বয়লার বা বাষ্প উৎপাদক (Steam Generator) এর বিকল্প বলা যেতে পারে। চুল্লিতে পরমাণুর বিভাজনের দরুন যে তাপের অবমোচন হয়ে থাকে তাকে ব্যবহার করে বাষ্প উৎপাদিত হয়। এই বাষ্প স্টিম টারবাইনে প্রসারিত হয়ে যে যান্ত্রিক শক্তি উৎপাদিত হয় তা অল্টারনেটরের মাধ্যমে বিদ্যুৎ উৎপাদন করে। এককথায় একটি Nuclear Power Plant এ বাষ্প উৎপাদনের পর বাকি প্রক্রিয়াসমূহ যেভাবে সম্পাদিত হয়ে থাকে তার সাথে প্রচলিত বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্রসমূহের সাথে কোনো পার্থক্য নেই। তবে কয়লা, তেল বা গ্যাস চালিত সর্বাধুনিক বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্রসমূহে সাধারণত উচ্চ চাপে অতিতাপিত বাষ্প ব্যবহৃত হয়। অপরদিকে পারমাণবিক বিদ্যুৎ কেন্দ্রসমূহের অধিকাংশ ক্ষেত্রে বিভিন্ন সীমাবদ্ধতার কারণে সংপৃক্ত বাষ্প ব্যবহৃত হয়ে থাকে। অতি উচ্চ চাপে বাষ্প ব্যবহারের ক্ষেত্রে বাষ্প পুন:তাপিত না হলে প্রসারণের সর্বশেষ ধাপে বাষ্পের গুণগত মান এমন হবে যে তাতে অধিক জলকণা বিদ্যমান থাকবে। একটি মলিয়ার চার্ট দিয়ে এটি অতি সহজেই দেখানো যায়। এই চার্টে চাপ যত বাড়বে ততই ধ্রুব চাপের লাইন মলিয়ার চার্টের তরল রেখার দিকে ধাবিত হয়। প্রসারণের পর পুন:তাপিত করে একে বাষ্প রেখার দিকে নিয়ে নেয়া যায়। চিত্রের সাহায্যে এটি ব্যাখ্যা করা হলো। কাজ সম্পাদন করে পরবর্তীতে কনডেনসারে পানিতে ঘনীভূত হয়ে কনডেনসেট পাম্পের সাহায্যে পুনরায় স্টিম জেনারেটরে ফিরে আসছে। T–S ডায়াগ্রামে সংশ্লিষ্ট র‍্যাঙ্কিন চক্র দেখানো হয়েছে।



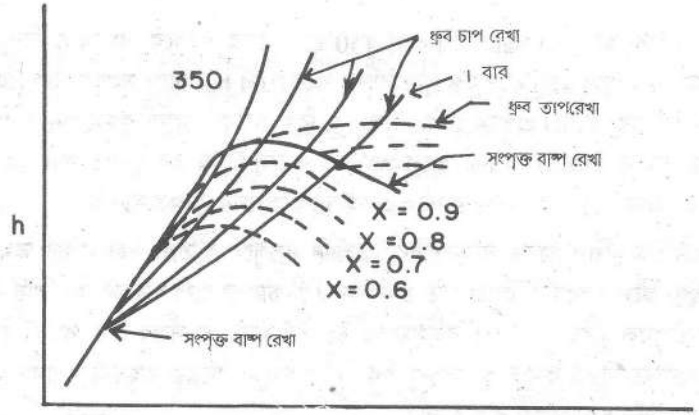
চিত্র ৪.৮ : তাপ–এনথালপি ডায়াগ্রামের ব্যবহার।

চিত্রে দেখা যাবে যে এরূপ আয়োজনে টারবাইনের শেষ ধাপে প্রসারিত বাষ্পে জলীয় কণার পরিমাণ অত্যন্ত অধিক হওয়া ছাড়াও স্টিম জেনারেটরে প্রাথমিক শীতক প্রবাহিত হয়ে এর তাপমাত্রা ক্রমান্বয়ে কমতে থাকবে। চিত্রের তথাকথিত পিঞ্চ বিন্দুটি (pinch point) এমন হওয়া উচিত যাতে প্রাথমিক শীতকের তাপমাত্রা সংশ্লিষ্ট চাপের সংপৃক্ত তাপের কিছু উপরে থাকে। উল্লেখ্য যে, এখানে H আসলে সংশ্লিষ্ট বস্তু প্রবাহের ভর এবং আপেক্ষিক তাপের (specific heat) গুণফল। অতএব Q যদি মোট তাপ প্রবাহ হয় তাহলে $Q = \Delta H$। অর্থাৎ আদর্শ অবস্থায় যে পরিমাণ তাপশক্তি প্রাথমিক শীতক হারায় সেই একই পরিমাণ তাপশক্তি বাষ্প উৎপাদনে ব্যবহৃত হয়। প্রাথমিক শীতক কার্বন ডাই-অক্সাইড, হিলিয়াম অথবা পানি (H_2O) কিংবা ভারি পানি (D_2O) হতে পারে।



চিত্র ৪.৯ : দ্বৈত চাপের চক্র।

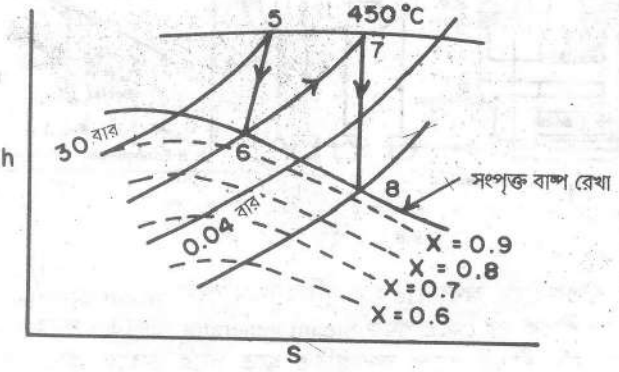
প্রাথমিক শীতক CO_2 অথবা He হলে চুল্লির সাথে পৃথক Steam generator থাকতে হবে। আর তরল শীতক এর ক্ষেত্রে পৃথক Steam generator থাকতেও পারে নাও থাকতে পারে। চুল্লিতে যদি শীতক বাষ্পে রূপান্তরিত হতে পারে তাহলে আর পৃথক স্টিম জেনারেটরের প্রয়োজন নেই। কারণ চুল্লিটি স্টিম জেনারেটরের কাজ করবে। আর চুল্লিতে



চিত্র ৪.১০ : বাষ্পের এনথালপির বিপরীত এনট্রপি ডায়াগ্রাম।

যদি প্রাথমিক শীতকটি বাষ্পে রূপান্তরিত না হয় তাহলে পৃথক স্টিম জেনারেটরের প্রয়োজন হবে। এমতাবস্থায় তরল পানি চুল্লিতে এমন চাপে প্রবাহিত করতে হবে যাতে কোনো অবস্থাতেই পানি বাষ্পে পরিণত না হয়। উচ্চ চাপ ও তাপে এই প্রাথমিক শীতক স্টিম জেনারেটরে বাষ্প উৎপাদন করবে। এর তাপশক্তি স্টিম জেনারেটরে স্থানান্তরিত হয়ে শীতক পুনরায় চুল্লিতে ফিরে আসবে। প্রথমোক্ত চুল্লিকে বয়লিং ওয়াটার রিয়্যাক্টর (BWR) এবং দ্বিতীয়টিকে প্রেসারাইজড ওয়াটার রিয়্যাক্টর (PWR) বলে।

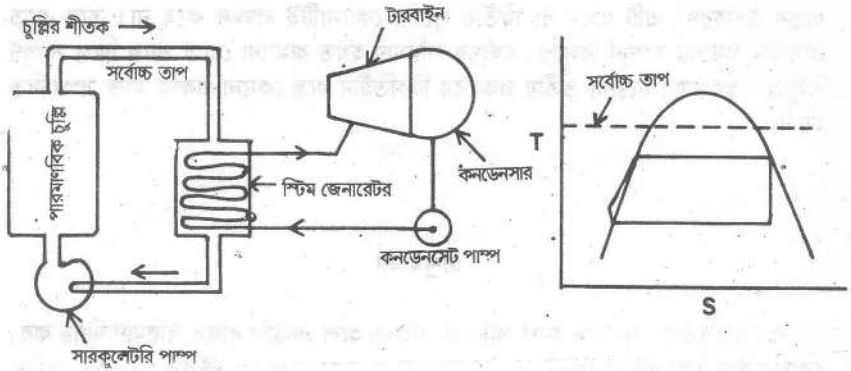
উদাহরণস্বরূপ 350 বার অথবা এর কাছাকাছি চাপের বাষ্প টারবাইনে প্রসারিত করলে সংশ্লিষ্ট বাষ্পের গুণগত মাত্রা অনেক কম হবে। অপরদিকে একই চাপের বাষ্পকে সংপৃক্ত রেখা পর্যন্ত প্রসারিত করে পুন:তাপিত করে প্রসারণ করা গেলে বাষ্পের গুণগত মান বেড়ে যাবে। চিত্রের সাহায্যে আর একটি উদাহরণ নিচে দেখানো হলো। (1 বার = 100 kPa)



চিত্র ৪.১১ : পুন:তাপিত বাষ্পের উদাহরণ।

চিত্রে 5 বিন্দু হতে 30 bar চাপে এবং 450°C তাপের বাষ্পকে প্রথমে 6 বিন্দুতে প্রসারিত করে ধ্রুব চাপে 450°C পর্যন্ত পুন:তাপিত করে 0.04 bar চাপে সংপৃক্ত বাষ্প রেখা পর্যন্ত প্রসারিত করা হলো। এখানে দেখা যাচ্ছে 5 বিন্দু থেকে কোনো রকম পুন:তাপিত প্রক্রিয়ার মাধ্যমে না গিয়ে 0.04 bar চাপে প্রসারিত করলে স্টিম এর গুণগত মান 0.6 এ চলে আসবে। অথচ পুন:তাপিত করার ফলে একই চাপে স্টিমের গুণগত মান এক।

পারমাণবিক চুল্লির ক্ষেত্রে পারমাণবিক জ্বালানি দণ্ডগুলোর তাপ সহ্য করার ক্ষমতা সীমিত থাকার ফলে এরকম চুল্লিতে অতি উচ্চ তাপ এবং চাপের বাষ্প ব্যবহার করা যায় না। হয়ত পরবর্তীকালে চুল্লিতে ব্যবহৃত বস্তুসমূহের উন্নতির ফলে তা সম্ভব হতে পারে। তবে আপাতত ব্যবহৃত চুল্লির কথাই আলোচনা করা যেতে পারে। চিত্রের সাহায্যে পারমাণবিক শক্তি চুল্লির র‍্যাঙ্কিন চক্র ব্যাখ্যা করা হলো।



চিত্র ৪.১২ : একটি সাধারণ পারমাণবিক চুল্লিতে র‍্যাঙ্কিন চক্রের ব্যবহার।

এখানে পারমাণবিক চুল্লিতে প্রাথমিক শীতক স্টিম জেনারেটরে বাষ্প তৈরি করছে এবং ঠাণ্ডা হয়ে সারকুলেটরি পাম্পের সাহায্যে পুনরায় চুল্লিতে ফিরে আসছে। অপরদিকে বাষ্প টারবাইনে প্রসারিত হয়ে ওয়াটার রিয়্যাক্টরে (PWR) ফিরে আসছে।

উল্লিখিত র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা বৃদ্ধির জন্য বাষ্প একক চাপে ব্যবহার না করে দ্বৈত চাপে ব্যবহার করা হয়। ৪.৯ চিত্রে এরূপ একটি চক্র দেখানো হয়েছে। এখানে প্রাথমিক শীতক CO_2 গ্যাস। গ্যাস একই চাপে ক্রিয়াশীল থাকলেও বাষ্প এখানে দুটি বিভিন্ন চাপে উৎপাদিত হচ্ছে। সে অনুযায়ী দ্বৈত চাপের বাষ্প নিম্নচাপ ও উচ্চচাপের টারবাইনে প্রসারিত হয়ে বিদ্যুৎ উৎপন্ন করছে। দশম অধ্যায়ে বর্ণিত রিজেনারেটিভ ফিড হিটিং এর ব্যবস্থাও এখানে করা হয়েছে। অতএব সার্বিকভাবে উল্লিখিত চক্রের দক্ষতা স্বাভাবিকভাবেই একক চাপের চক্র থেকে অনেক বেশি হবে। ব্রিটেনের ম্যাগনক্স টাইপের চুল্লিসমূহে এরূপ চক্র ব্যবহৃত হয়।

৪.৮ বিরতিহীন যন্ত্র (Perpetual Motion Machines)

বিরতিহীন যন্ত্র তিন প্রকারের হতে পারে। প্রথম প্রকারটি হলো এমন একটি যন্ত্র যা চক্রাকারে চালু থেকে তা চালু রাখার জন্য যে তাপ শক্তির যোগান দেয়া হয় তার চেয়ে অধিক শক্তি উৎপাদন করে। এরূপভাবে যন্ত্রটি প্রথম সূত্র লঙ্ঘন করে। এ ধরনের বহু যন্ত্রের কথা শোনা গেছে কিন্তু কোনোটিই এ পর্যন্ত কার্যক্ষেত্রে কর্মরত দেখা যায়নি।

দ্বিতীয় প্রকারের বিরতিহীন যন্ত্রটি চক্রাকারে চালু থেকে একটি নির্দিষ্ট তাপে বস্তুর সাথে তাপ বিনিময় করে বিধায় এটি দ্বিতীয় সূত্র লঙ্ঘন করে। এই যন্ত্রটি প্রথম সূত্র লঙ্ঘন করে না। তবে এটি প্রথম প্রকারের যন্ত্রের মতো কোনো শক্তি উৎপাদন করে না।

সময় সময় তৃতীয় প্রকারের বিরতিহীন যন্ত্রের কথা বলা হয় যা একবার চালু হলে তার গতি কমেও না এবং বন্ধও না হয়ে অনন্তকাল ধরে চলতে থাকবে বলে ধারণা করা হয়। একটি ঘর্ষণহীন তীলকে ঘূর্ণায়মান লাটিম এবং ঘর্ষণহীন বিয়ারিং এ ঘূর্ণায়মান ফ্লাইহুইল এরূপ

যন্ত্রের উদাহরণ। এটি প্রথম বা দ্বিতীয় সূত্রের কোনোটিই লঙ্ঘন করে না। তবে এতে প্রয়োজন ঘর্ষণের সম্পূর্ণ বিলুপ্তি। ঘর্ষণের পরিমাণ হয়ত কমানো যেতে পারে কিন্তু সম্পূর্ণ বিলুপ্তি সম্ভব নয়। উল্লেখ্য তৃতীয় প্রকারের বিরতিহীন যন্ত্রে কোনো প্রকার কাজ সম্পাদিত হয় না।

প্রশ্নমালা

১। 0°C তাপে 50 গ্রাম বরফ পানিতে পরিণত হলে এনট্রপি বৃদ্ধির পরিমাণ নির্ণয় কর। বরফের সুপ্ত তাপ 80 Cal/gm. **উত্তর :** 14.65 Cal/K

২। 100°C তাপে 10 গ্রাম পানি এবং 10 গ্রাম বাষ্পের এনট্রপির পার্থক্য নির্ণয় কর। বাষ্পের সুপ্ততাপ = 540 Cal/gm. **উত্তর :** 14.48 Cal/K

৩। একটি কার্নো-ইঞ্জিন 400K এবং 300K তাপের উৎসের মধ্য চালু রয়েছে। (ক) ইঞ্জিনটি যদি প্রতি চক্রে 400K উৎস থেকে 1200 ক্যালরি তাপ গ্রহণ করে তাহলে 300K তাপের উৎসে কত তাপ বর্জন করে? (খ) যদি ইঞ্জিনটি বিপরীতভাবে রেফ্রিজারেটর হিসেবে কাজ করে 300K তাপের উৎস থেকে 1200 ক্যালরি গ্রহণ করে তাহলে 400K উৎসে কি পরিমাণ তাপশক্তি বর্জন করবে? **উত্তর :** (ক) 900 Cal. (খ) 1600 Cal.

৪। P–V ডায়াগ্রামের সাহায্যে কার্নো চক্র ব্যাখ্যা কর। একটি আদর্শ গ্যাসকে কার্যকর গ্যাস ধরে প্রমাণ কর যে কার্নো ইঞ্জিনের দক্ষতা $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$।

৫। প্রত্যাবর্তী চক্র কি? প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিন বলতে কি বুঝ? প্রমাণ কর ঐসব প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনের দক্ষতা সমান হবে যদি সেগুলো দুটি অভিন্ন তাপ সীমারেখার মধ্যে চালু থাকে। আরো প্রমাণ কর প্রত্যাবর্তী ইঞ্জিনের দক্ষতা সবচেয়ে বেশি।

৬। কার্নো চক্রের জন্য P–V এবং T–S ডায়াগ্রাম অংকন কর। T–S ডায়াগ্রাম ব্যবহার করে এই চক্রের দক্ষতা নির্ণয় কর।

৭। তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র কি? এনট্রপি কি এ সম্বন্ধে পূর্ণ ব্যাখ্যা দাও।

পঞ্চম অধ্যায়

এনট্রপি

(Entropy)

৫.১ সংজ্ঞা

এনট্রপি বস্তুর এমন একটি তাপগতীয় গুণ যা শুরু থেকেই গাণিতিকভাবে নিম্নরূপে সংজ্ঞায়িত করা হয়েছে,

$$ds = \frac{dQ}{T}$$

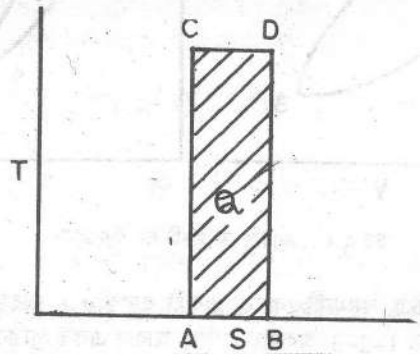
এখানে সংজ্ঞাটি এমন যে এতে এনট্রপি s এর ক্ষুদ্র পরিবর্তন এর সাথে ধ্রুব T তাপমাত্রায় গৃহীত বা বর্জিত তাপের পরিবর্তন dQ এর সম্পর্ক সূচিত হয়েছে। অন্য কথায় কোনো বস্তু যদি T তাপমাত্রায় dQ পরিমাণ তাপ গ্রহণ অথবা বর্জন করে তাহলে s এর ক্ষুদ্র পরিবর্তন, $ds = \frac{dQ}{T}$ ।

কোনো প্রক্রিয়ায় বস্তু এক অবস্থা A থেকে অন্য অবস্থা B তে গেলে বস্তুর মোট এনট্রপির পরিবর্তন,

$$s_B - s_A = \int_A^B ds = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

অথবা $s = \frac{Q}{T}$ ।

$\therefore$ $Q = T \times s$



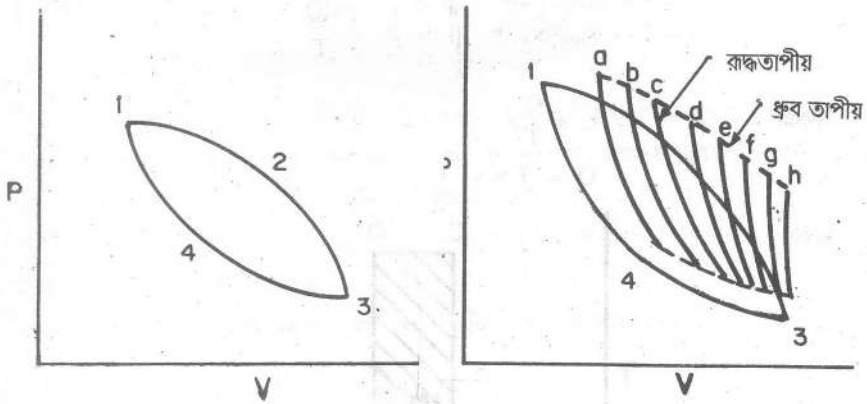
চিত্র ৫.১ : এনট্রপির ব্যাখ্যা।

৫.১ চিত্র অনুযায়ী কোনো বস্তু যদি T ধ্রুব তাপমাত্রায় Q পরিমাণ তাপ গ্রহণ করে তাহলে ABCD আয়তক্ষেত্র Q এর পরিমাণ নির্দেশ করে এভাবে,

$$Q = ABCD = T.(s_B - s_A)$$

$$= T \times s \text{ এর মোট পরিবর্তন}$$

এ পর্যন্ত যা বলা হলো তাতে বুঝা যাচ্ছে যে এনট্রপিকে গাণিতিকভাবে অর্থাৎ ক্যালকুলাসের মাধ্যমে সংজ্ঞা দেয়া ছাড়া সরাসরি কোনো ভৌত অবয়ব এর সাহায্যে এর কোনো সংজ্ঞা দেয়া সম্ভব নয়। তবে একে যদি বস্তুর একটি গুণ হিসেবে দেখানো যায় তবে বিষয়টি আরো পরিষ্কার হবে। তাপগতীয় বিবেচনায় কোনো একটি ব্যবস্থা বা যন্ত্র যদি বিভিন্ন প্রক্রিয়ার মাধ্যমে একটি চক্র সম্পূর্ণ করে তাহলে ব্যবস্থাটি এর প্রারম্ভিক অবস্থায় ফিরে আসে। ফলে অবস্থাটির যে কোনো একটি উদ্দিষ্ট গুণের মান পূর্বাবস্থায় ফিরে যায়। কারণ এই মান সর্বদা অবস্থার উপর নির্ভরশীল। চক্র সম্পূর্ণ হলে প্রারম্ভিক এবং চূড়ান্ত অবস্থা অভিন্ন। কাজেই চক্রটি শুরু হওয়ার সময় উদ্দিষ্ট গুণটির যে মান ছিল চক্র শেষ হওয়ার পর তা হুবহু একই থেকে যায়। যদিও চক্রের মধ্যে এর অনেক পরিবর্তন হতে পারে। গাণিতিকভাবে এটিকে এভাবে বলা যায় যে এর সাইক্লিক এনট্রপি শূন্য। অন্যকথায় কোনো একটি সংখ্যা যে তাপগতীয় গুণ তা প্রমাণ করার একটি উপায় হলো কোনো চক্রের শুরু থেকে শেষ পর্যন্ত সেই সংখ্যাটির সমষ্টি (Integral) শূন্য দেখানো। অতএব এনট্রপি যে একটি গুণ তা প্রমাণ করার জন্য $\oint = \frac{dQ}{T} = 0$ দেখাতে হবে।



চিত্র ৫.২ : এনট্রপি যে একটি ধর্ম তার প্রমাণ।

মনে করি ৫.২ চিত্র অনুযায়ী কোনো একটি ব্যবস্থায় 1 অবস্থা থেকে প্রত্যাবর্তীয় (reversible) প্রক্রিয়ায় 1–2–3 অবস্থায় পৌঁছে আবার একই প্রক্রিয়ায় 3–4–1 অবস্থায় অর্থাৎ আদি অবস্থায় ফিরে আসল। এই প্রক্রিয়াসমূহ এভাবে একটি চক্র সম্পূর্ণ করলো।

উল্লিখিত মূল প্রক্রিয়াসমূহকে কতকগুলো প্রত্যাবর্তীয় রুদ্ধতাপীয় এবং সমোষ্ণ প্রক্রিয়ামালা দ্বারা প্রতিস্থাপন করা যায়। এভাবে মূল প্রক্রিয়ার জায়গায় অনেকগুলো কার্নো চক্র আঁকা যায়। কার্নো চক্র a–b–c–d এবং c-f-g-h থেকে তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র অনুসারে,

$$\frac{Q_{H\,a\text{-}b}}{T_{H\,a\text{-}b}} = \frac{Q_{Lc\text{-}d}}{T_{Lg\text{-}h}}$$

$$\frac{Q_{He\text{-}f}}{T_{He\text{-}f}} = \frac{Q_{Lg\text{-}h}}{T_{Lg\text{-}h}}$$

এখানে Q_H এবং Q_L যথাক্রমে তাপশক্তি গ্রহণ এবং তাপশক্তি বর্জন নির্দেশ করে। অনুরূপভাবে T ধ্রুব প্রক্রিয়াসমূহের তাপমাত্রা নির্দেশ করে। এখানে অবশ্য তাপ গ্রহণ এবং বর্জনের ক্ষেত্রে যথাক্রমে ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক সূচক বিবেচনায় আনা হয় নাই। ধনাত্মক এবং ঋণাত্মক বিষয়টি বিবেচনায় আনা হলে সমীকরণগুলো নিম্নরূপ লেখা যায়,

$$\frac{Q_{Ha\text{-}b}}{T_{Ha\text{-}b}} + \frac{Q_{Lc\text{-}d}}{T_{Lg\text{-}h}} = 0$$

$$\frac{Q_{He\text{-}f}}{T_{He\text{-}f}} + \frac{Q_{Lg\text{-}h}}{T_{Lg\text{-}h}} = 0$$

এভাবে যদি অসংখ্য কার্নো চক্র আঁকা যায় তাহলে,

$$\left(\frac{Q_{Ha\text{-}b}}{T_{Ha\text{-}b}} + \frac{Q_{Lc\text{-}d}}{T_{Lc\text{-}d}}\right) + \left(\frac{Q_{He\text{-}f}}{T_{He\text{-}f}} + \frac{Q_{Lg\text{-}h}}{T_{Lg\text{-}h}}\right) + \ldots\ldots = 0$$

উপরিউক্ত সমষ্টিজ্ঞাপক রাশিমালার Q দ্বারা চূড়ান্ত তাপমাত্রা (absolute temperature) T তে তাপশক্তি স্থানান্তরের পরিমাণ বুঝানো যেতে পারে। এ অবস্থায়, প্রত্যাবর্তীয় চক্রে $\sum \frac{Q}{T} = 0$

কার্নো চক্রের সংখ্যা যদি অনেক বাড়ানো হয় তাহলে প্রস্তাবিত অসংখ্য ধাপের সাহায্যে প্রতিস্থাপিত ক্ষুদ্র চক্রগুলো মূল চক্রের প্রায় কাছাকাছি চলে যাবে। অবশেষে, কার্নো চক্রের সংখ্যা অত্যন্ত বড় হলে $\frac{Q}{T}$ রাশিগুলোর সমষ্টি ইন্টিগ্রাল $\frac{dQ}{T}$ এর সমান হবে। অতএব,

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

এই ফল থেকে উপসংহার টানা যায় যে, $\int \frac{dQ}{T}$ একটি তাপগতীয় গুণ যা শুধু চূড়ান্ত অবস্থার উপর নির্ভরশীল। চূড়ান্ত অবস্থায় পৌঁছতে প্রক্রিয়াটি যে পথে অগ্রসর হয়েছে তার উপর এ গুণ নির্ভরশীল নয়।

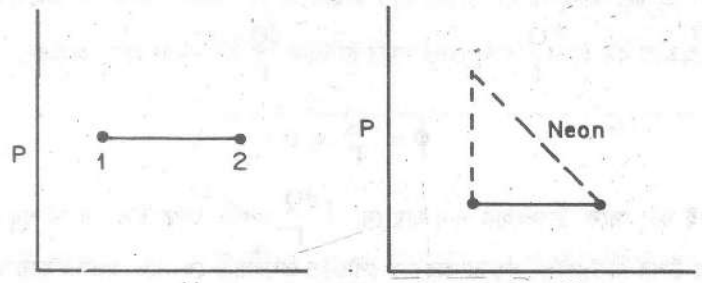
উল্লেখ করা প্রয়োজন যে $\int \frac{dQ}{T}$ যদি এমন দুটি অবস্থার মধ্যে হিসাব করা হয় যেখানে এক অবস্থা থেকে অন্য অবস্থায় পৌছার প্রক্রিয়াটি প্রত্যাবর্তীয় নয় তাহলে $\int \frac{dQ}{T} = 0$ না হয়ে সাধারণভাবে প্রতিটি ক্ষেত্রে ভিন্ন হবে। অন্যকথায় এ অবস্থায় $\int \frac{dQ}{T}$ একটি গুণ হিসেবে বিবেচিত হবে না। আসলে $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$ ধরা যায়, এখানে প্রত্যাবর্তীয় চক্রের ক্ষেত্রে $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ এবং অপ্রত্যাবর্তীয় চক্রের ক্ষেত্রে অসমান। এই সর্বজনীন মন্তব্যটি যা ক্লসিয়াসের ইনইকুইলিটি হিসেবে পরিচিত তা কিছু কিছু তাপগতীয় বিশ্লেষণে ব্যবহৃত হয়ে থাকে। এনট্রপির সংজ্ঞা থেকে বলা যায় যে কোনো প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়ায় বদ্ধ ব্যবস্থা হোক বা অপরিবর্তনীয় প্রবাহ হোক উভয় ক্ষেত্রে $q = \int Tds$ অর্থাৎ T এবং s কো-অর্ডিনেটের মধ্যে যে কোনো আয়তক্ষেত্র তাপশক্তি স্থানান্তরের পরিমাণ নির্দেশ করে। খোলা ব্যবস্থায় T তাপমাত্রা যে স্থানে তাপ স্থানান্তর হয় সেই স্থানের তাপমাত্রা বুঝায়।

৫.২ এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় (Determination of change of entropy)

এনট্রপির মান প্রকাশিত সারণিসমূহ এবং তাপগতীয় গুণের কম্পিউটার প্রোগ্রাম থাকলেও অনেক সময় বিভিন্ন প্রক্রিয়ার জন্য এনট্রপি পরিবর্তন নির্ণয়ের প্রয়োজন হয়ে থাকে। যে কোনো দুটি অবস্থার সংযোগকারী প্রত্যাবর্তীয় পথ বেছে নিয়ে এনট্রপির সংজ্ঞা থেকে আমরা Δs নির্ণয় করতে পারি। উদাহরণ নিচে দেয়া গেল।

উদাহরণ : ৫.২.১ : একটি বদ্ধ ব্যবস্থায় 120 kPa ধ্রুব চাপে 20°C থেকে 110°C তে নিয়ন গ্যাস উত্তপ্ত করলে এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।

সমাধান : এখানে নিয়নের ভর সম্বন্ধে কিছু বলা হয়নি বিধায় প্রতি একক ভরের ভিত্তিতে হিসাব করা যায়। উল্লিখিত কম চাপে নিয়ন গ্যাসকে আদর্শ গ্যাস ধরা যায়। নিয়ন যেহেতু এক পরমাণু সম্পন্ন গ্যাস সেহেতু এর আপেক্ষিক তাপ (specific heat) ধ্রুব হবে। নিয়ন গ্যাসের PV চিত্র নিম্নরূপ :



চিত্র : ৫.৩

ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়ায় $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{383}{293}$

$\therefore \quad \Delta S = \int_1^2 \left(\frac{dQ}{T}\right)$

তাপগতীয় প্রথম সূত্র থেকে

$$dQ = du + dw$$
$$= du + pdv$$
$$= du + d(pv)$$
$$= d(u + pv) = dh = c_p dT$$

dQ এর মান বসিয়ে

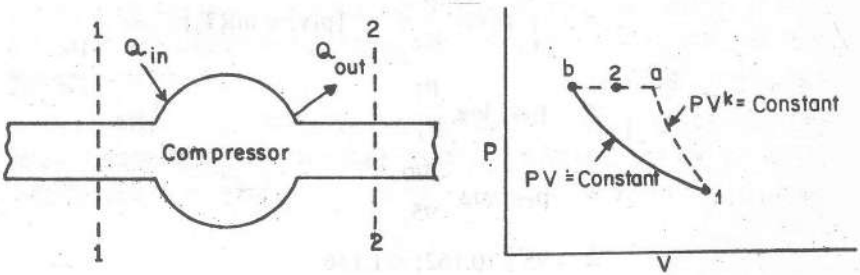
$$\Delta S = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = C_p \log_e \frac{T_2}{T_1}$$

$$= 1.03 \log_e \frac{383}{293}$$

$$= 0.276 \text{ kJ/Kg.K} \qquad [c_p = 1.03 \text{ kJ/kg.K}]$$

উদাহরণ ৫.২.২ : 100 kPa চাপ এবং 24°C তাপ থেকে বাতাস কমপ্রেসারে সংকুচিত হয়ে 345.0 kPa চাপে এবং 121°C তাপে সরবরাহ করা হচ্ছে। বাতাসের এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।

সমাধান : এখানে সংকোচন প্রক্রিয়াটি সম্বন্ধে কিছু বলা হয়নি। তবে যে কোনো প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়া ধরে হিসাব করা যায়।



এখানে দুটি প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়া দেখানো হয়েছে, একটি 1 – a এবং 1 – b। প্রথমটি রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া এবং দ্বিতীয়টি সমোষ্ণ তাপীয় প্রক্রিয়া।

অতএব 1 – a এর ক্ষেত্রে $P_1V_1^k = P_aV_a^k$ 1 – b এর ক্ষেত্রে $P_1V_1 = P_aV_a$

$$PV = RT$$

$$\therefore \quad V = \frac{RT}{P}$$

$$\frac{V_b}{V_1} = \frac{P_1}{P_b}$$

$$\therefore \Delta S = \int_1^b \frac{dQ}{T} = -\int \frac{Vdp}{T}$$

$$= -R \int_1^b \frac{dp}{p} = -0.287 \text{ kJ/kgK}$$

$$\log_e \frac{345}{100}$$

$$= -0.355 \text{ kJ/kgK}$$

রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় এনট্রপির কোনো পরিবর্তন হয় না।

উদাহরণ ৫.২.৩ : একটি চোঙ্গের বাতাসকে 95 kPa চাপ এবং 25°C থেকে প্রত্যাবর্তীয় সমোষ্ণ তাপ প্রক্রিয়ায় সংকুচিত করে 290 kPa এ নেয়া হলো। বাতাসের প্রারম্ভিক আয়তন 0.162 m^3। এই সংকোচনের জন্য কি পরিমাণ কাজ করতে হলো, তাপ স্থানান্তর এবং এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর।

কাজ, $W = -\int_1^2 vdp \qquad [pv = mRT]$

অথবা $W = -\int_1^2 \frac{mRT}{P} dp$

$$= -\int_1^2 p_1v_1 \frac{dp}{p} \qquad [p_1v_1 = mRT_1]$$

$$= -p_1v_1 \log_e \frac{P_2}{P_1}$$

$$= -p_1v_1 \log_e \frac{290}{95}$$

$$= -95 \times (0.162) \times 1.116$$

$$W = -17.175 \text{ kJ}$$

$$Q = U_2 - U_1 + w = 0 - 17.175 \text{ kJ}$$

$$\therefore \quad Q = -17.175 \text{ kJ}$$

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

$$= -\frac{Q}{T}$$

$$= \frac{-17.175}{25+273}$$

$$= -\frac{17.175}{298}$$

$$\Delta S. = -0.0576 \text{ kJ/K}$$

প্রশ্নমালা

১। মলিয়ার চার্ট ব্যবহার করে নিম্নলিখিত অবস্থায় পানির (a) মোট তাপশক্তি, (b) এনট্রপি এবং (c) তাপ নির্ণয় কর :

$x = 0.96, \quad P = 0.02$ MPa

(a) 2515 kJ/kg, (b) 7.6 kJ/kg. K (c) 60°C

২। 27°C তাপ এবং 150 kPa চাপের বাতাসকে ধ্রুব তাপীয় প্রক্রিয়ায় সংকুচিত করে 300 kPa চাপে নেয়া হলো। এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর। **উত্তর :** 0.1989 kJ/kgK

৩। 45°C তাপ এবং 100 kPa চাপের বাতাসকে সংকুচিত করে 90°C তাপ এবং 400 kPa চাপে (রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায়) নিয়ে গেলে এনট্রপির পরিবর্তন এবং কাজের পরিমাণ নির্ণয় কর। **উত্তর :** (a) $\Delta S = 0.2645$ kJ/kg.K (b) $W_{1-2} = -45.36$ kJ/kg.

৪। 4 kg বাতাস আদি চাপ 0.4 MPa থেকে প্রত্যাবর্তী এবং সমোষ্ণ প্রক্রিয়ায় 0.2 MPa এবং 300°C তাপে প্রসারিত হলো। আদি তাপ 325°C হলে মোট তাপ স্থানান্তরের পরিমাণ নির্ণয় কর। **উত্তর :** – 474.3 kJ

৫। একটি গ্যাসের বোতলে 1 kg বাতাস 27°C তাপ এবং 500 kPa চাপে রয়েছে। বোতলটি এমনভাবে খুলে রাখা হলো যাতে বের হতে হতে বোতলের চাপ 100 kPa হলো। এনট্রপির পরিবর্তন নির্ণয় কর। **উত্তর :** 0.193 kJ/K

BANGLADESH Library Dhaka

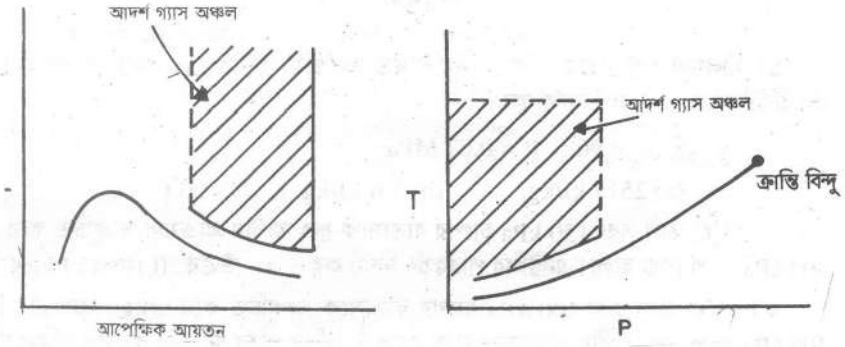
ষষ্ঠ অধ্যায়

গ্যাস এবং বাষ্পের মিশ্রণ

(Mixtures of gases and vapours)

৬.১ আদর্শ এবং প্রকৃত গ্যাসের তুলনা (Comparison of Ideal Gas with Real Gas)

অষ্টম অধ্যায়ে বলা হয়েছে যে পরীক্ষামূলক পর্যবেক্ষণ দ্বারা আদর্শ গ্যাসের অবস্থার সমীকরণ নির্ধারণ করা হয়। গ্যাসের আণবিক আচরণ, তাত্ত্বিকভাবে নির্ণীত ফলাফল এবং বিভিন্ন অবস্থার ব্যাপক পরিসরে গবেষণাগারের প্রকৃত তথ্যসমূহ বিবেচনায় এনে আদর্শ গ্যাস সমীকরণের যথার্থ প্রয়োগের পরিমাণ চিহ্নিত করা সম্ভব হয়েছে।



চিত্র : ৬.১

পরীক্ষামূলক তথ্য থেকে দেখা যায় যে, এমন একটি পরিমণ্ডল যেখানকার চাপ কোনো খাঁটি বা অবিমিশ্র বস্তুর ক্রান্তি চাপ থেকে অনেক নিচে এবং বস্তুর ঘনত্ব অনেক কম এরূপ পরিমণ্ডলে আদর্শ গ্যাস সমীকরণ প্রয়োগযোগ্য। তাছাড়া প্রকৃত গ্যাসের তাপ যখন এর ক্রান্তি তাপের নিচে না হয়ে উপরে থাকে তখন আদর্শ গ্যাস মডেল দ্বারা প্রকৃত গ্যাসের যথাযথ বর্ণনা সম্ভব। উল্লিখিত পরিমণ্ডলটি উচ্চ তাপ এবং নিম্ন চাপ দ্বারা পরিসীমিত। তবে চাপ যখন শূন্যের দিকে ধাবিত হয় তখন পরিমণ্ডলটি ক্রান্তি তাপের তুলনায় নিম্ন তাপেও সম্প্রসারিত হয়। পরিমণ্ডলটিতে নিম্নলিখিত শর্তসমূহ মানা সাপেক্ষে আদর্শ গ্যাস মডেল প্রয়োগ করা যায় :

(১) চাপ যখন শূন্যে ধাবিত হয় (অর্থাৎ উদ্দিষ্ট বস্তুর চাপ তার ক্রান্তি চাপের অনেক নিচে থাকতে হবে)

(২) তাপমাত্রা বস্তুটির ক্রান্তি তাপের দ্বিগুণ হতে হবে।

(৩) বস্তুটির আণবিক ওজন কম।

এই তিনটি শর্তের মধ্যে নিম্নচাপের শর্তটি সবচেয়ে বেশি গুরুত্বপূর্ণ।

প্রকৌশলে প্রায়োগিক দিক দিয়ে বায়ুমণ্ডলীয় বাতাস একটি বিশেষভাবে বিবেচ্য বস্তু। বাতাসের প্রাথমিক গঠনকারী উপাদান দুটি– নাইট্রোজেন এবং অক্সিজেন। উভয় গ্যাসের ক্রান্তি চাপ সাধারণ বায়ুমণ্ডলীয় চাপ অর্থাৎ 0.1 MPa এর অনেক উপরে এবং ক্রান্তি তাপ ভূপৃষ্ঠ পরিবেষ্টনকারী বাতাসের তাপের অনেক নিচে। ফলে, বাতাসের ক্ষেত্রে বায়ুমণ্ডলীয় চাপের 25 গুণ চাপ এবং 25°C কিংবা এর অধিক তাপেও আদর্শ গ্যাস সমীকরণ কার্যকর। এমনকি এক বায়ুমণ্ডলীয় চাপ কিংবা এর কম চাপে এবং সর্বনিম্ন – 100°C তাপে এই সমীকরণ প্রযোজ্য। জলীয়বাষ্পের ব্যাপারে অবস্থাটা ততটা অনুকূল নয়। পানির ক্রান্তি চাপ 218 atm. এবং ক্রান্তি তাপ 647K। এমবিয়েন্ট চাপ ও তাপমাত্রায় বাষ্পকে প্রায় আদর্শ গ্যাস হিসেবে গণ্য করা গেলেও ক্রান্তি চাপের কাছাকাছি উচ্চ চাপে আদর্শ গ্যাস মডেল এক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়।

৬.২ আংশিক চাপ এবং মোট চাপ (Partial and Total Pressure)

কঠিন অথবা তরল পদার্থের অণুর তুলনায় গ্যাসের অণুগুলোর পরস্পরের দূরত্ব অনেক বেশি এবং এগুলো সর্বদা গতিশীল। একমাত্র চরম হিমাঙ্ক (absolute zero temperature) ছাড়া অন্য যে কোনো তাপে এগুলো সর্বত্র ছুটাছুটি করতে থাকে। ফলে গ্যাসকে কোনো পাত্রে আবদ্ধ না করলে এর অস্তিত্বই খুঁজে পাওয়া যাবে না। গ্যাসের গতিতত্ত্ব (kinetic theory) অনুযায়ী এর গতিশক্তি এই গতির উপর নির্ভরশীল। এই গতি নির্ভর করে তাপের উপর। কোনো গ্যাসের তাপমাত্রা চরম হিমাঙ্কে চলে গেলে গ্যাসের অণুগুলোর কোনো গতি থাকে না। ফলে এর কোনো গতিশক্তিও থাকে না। গ্যাসের গতিশক্তির দরুনই চাপ অনুভূত হয়। তিনটি গ্যাস 1, 2 এবং 3 যদি তিনটি পৃথক পাত্র যার প্রতিটির আয়তন 1 কিউবিক মিটার এবং প্রতিটি গ্যাস T তাপমাত্রায় থাকে তাহলে গতিতত্ত্ব অনুসারে প্রতিটি গ্যাসের গতিশক্তি অভিন্ন হবে। তিনটি গ্যাসের মোট গতিশক্তি তিনটি গ্যাসের গতিশক্তির সমষ্টি। এখন যদি এই তিনটি গ্যাস একটি 1 কিউবিক মিটার আয়তনবিশিষ্ট পাত্রে একই তাপে রাখা হয় তাহলে প্রতিটি গ্যাসের আয়তন 1 ঘন মিটারই হবে এবং এদের ঘনত্বের কোনো পরিবর্তন হবে না। নতুন পাত্রেও মোট গতিশক্তি একইভাবে তিনটি গ্যাসের গতিশক্তির যোগফল। অতএব পাত্রটির মোট চাপ তিনটি গ্যাসের চাপের সমষ্টি। অন্য কথায়,

$$\text{মোট চাপ } P = P_1 + P_2 + P_3$$

এখানে P কে বলা হয় মোট চাপ P_1, P_2 এবং P_3 যথাক্রমে গ্যাস 1, 2 এবং 3 এর আংশিক চাপ $PV = mRT$ থেকেও এটি প্রমাণ করা যায়

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

আবার $N = \frac{m}{M}$ [m এর মান বসিয়ে]

$PV = NMRT$

অথবা $PV = NRT$ [$\therefore MR = R$]

মিশ্রণের মোল নাম্বার

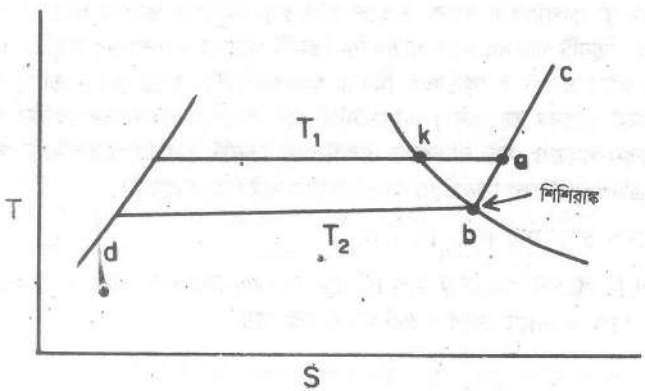
$N = N_1 + N_2 + N_3$

অথবা $\frac{PV}{RT} = \frac{P_1V}{RT} + \frac{P_2V}{RT} + \frac{P_3V}{RT}$

$\therefore P = P_1 + P_2 + P_3$

৬.৩ মিশ্রিত গ্যাস ও বাষ্পের এমন অবস্থা যখন বাষ্পের দশা পরিবর্তনশীল (State of mixtures of gases and vapours when the latter undergoing phase change)

অবস্থা অনেক সময় এমনও হতে পারে যে কোনো মিশ্রণের অন্যতম উপাদান হিসেবে বিদ্যমান বাষ্প সংপৃক্তিসীমার (saturation) এমন কাছাকাছি যে প্রক্রিয়াধীন অবস্থায়ই কিছুটা দশার পরিবর্তন হয়ে যায়। ফলে উল্লিখিত গ্যাসসমূহ ইতোমধ্যে বাষ্পের দশা পরিবর্তন হেতু তরল পদার্থের সংস্পর্শে আসতে পারে। আমাদের দৈনন্দিন জীবনে এরূপ পরিস্থিতির প্রকৃত উদাহরণ হলো : মোটর গাড়ির ইঞ্জিনের পেট্রোল এবং বাতাসের মিশ্রণ। তাছাড়া সাধারণত বায়ুমণ্ডলীয় বাতাসে ও জলীয়বাষ্প অনিবার্যভাবেই বিদ্যমান থাকে। তাপ যদি যথোচিতভাবে কমে যায় তাহলে বাতাসের অন্য উপাদানগুলোরও ঘনীভবন হতে পারে। এ ধরনের গ্যাস এবং বাষ্পের মিশ্রণে ঘনীভবনযোগ্য উপাদানকে v দ্বারা এবং উল্লিখিত গ্যাসটি যদি বাতাস হয় তাহলে একে শুকনা বাতাস অথবা সংক্ষেপে da (dry air) দ্বারা বুঝানো হয়। তবে সর্বপ্রথম এই বিষয়ের সাথে সংপৃক্ত বিশেষ কিছু কারিগরি সংজ্ঞা জানা থাকা প্রয়োজন।



চিত্র ৬.২ : T–S চিত্রে শিশিরাঙ্ক এবং আপেক্ষিক আর্দ্রতা দেখানো হয়েছে।

৬.৩.১ শিশিরাঙ্ক (Dew point) : শিশিরাঙ্ক (Dew point) এমন একটি তাপমাত্রা নির্দেশ করে যাতে জলীয়বাষ্প অতিতাপিত (superheated) বাষ্প থেকে শুষ্ক সংপৃক্ত বাষ্পে (saturated steam) রূপান্তরিত হয়। এই অবস্থানে তাপশক্তি আরো অপসারণ করলে বাতাসে শিশির জমা হয়। এই সংপৃক্ত অবস্থার তাপমাত্রাকে শিশিরাঙ্ক বলা হয়। গ্লাসে বরফ অথবা পানির মিশ্রণ রাখলে গ্লাসের গায়ে যে বিন্দু বিন্দু পানি জমে তাই শিশির।

চিত্রে a বিন্দুতে অতিতাপিত বাষ্পের একটি বিশেষ অবস্থান দেখানো হয়েছে। ধ্রুব চাপ প্রক্রিয়ায় অর্থাৎ চাপের কোনো রকম পরিবর্তন ছাড়া a বিন্দুস্থ বাষ্পকে যদি ঠাণ্ডা করা হয় তাহলে ধ্রুব চাপ লাইন cab অনুসারে b বিন্দুতে পৌঁছলে অতিতাপিত বাষ্প সংপৃক্ত বাষ্পে রূপান্তরিত হবে। b বিন্দুস্থ বাষ্পকে আরো ঠাণ্ডা করা হলে বাষ্পের ঘনীভবন শুরু হয়ে শিশির জমা হবে। b বিন্দুকে শিশিরাঙ্ক বলা হয়। যতক্ষণ পর্যন্ত ঘনীভবন সম্পূর্ণ না হবে b বিন্দুর তাপমাত্রা T_2 এর নিচে নেয়া সম্ভব নয়। T_2 লাইন সমোষ্ণ তাপমাত্রা প্রক্রিয়া নির্দেশ করে। অন্য কথায় b থেকে d পর্যন্ত তাপ শক্তি অপসারিত করা যাবে কিন্তু তাপ T_2–ই থেকে যাবে। b বিন্দুতে সম্পূর্ণ সংপৃক্ত বাষ্প এবং d বিন্দুতে সম্পূর্ণ তরল পানি বিদ্যমান। b এবং d এর মধ্যবর্তী যে কোনো অবস্থানে পানি এবং বাষ্পের মিশ্রণ নির্দেশ করে। অবস্থানটি b বিন্দুর যত কাছে থাকবে তত পরিমাণ বাষ্পের অস্তিত্ব এবং d বিন্দুর যত কাছে থাকবে সেই অনুপাতে পানির পরিমাণ নির্দেশ করবে।

যদিও যে কোনো অতিতাপিত বাষ্পের শিশিরাঙ্ক রয়েছে, তবে গ্যাস এবং বাষ্পের মিশ্রণের ক্ষেত্রেই শুধু এটি ব্যবহৃত হয়। a বিন্দুস্থ বাষ্পের চাপ জানা থাকলে সেই চাপের সংপৃক্ত তাপমাত্রাই (saturation temperature) শিশিরাঙ্ক।

৬.৩.২ আপেক্ষিক আর্দ্রতা (Relative humidity) আসলে কোনো গ্যাস এবং বাষ্পের মিশ্রণের বিদ্যমান বাষ্পের প্রকৃত আংশিক চাপ এবং উল্লিখিত মিশ্রণের তাপের সাথে সংপৃক্ত বাষ্পের চাপের অনুপাত।

চিত্রে $$\phi = \frac{\text{actual } P_v \text{ at } T_1}{\text{saturation } P_v \text{ at } T_1} = \frac{P_{va}}{P_{vk}}$$

এখানে উল্লেখ করা যায় যে আপেক্ষিক আর্দ্রতা অতিতাপিত বাষ্পের গুণ হলেও এটি শুধু গ্যাস ও বাষ্পের মিশ্রণের ক্ষেত্রেই ব্যবহৃত হয়ে থাকে। এ ধরনের অনেক মিশ্রণে বাষ্পের আংশিক চাপ এত কম থাকে যে বাষ্পের অণুগুলো যথেচ্ছভাবে পরস্পর থেকে অনেক দূরে অবস্থান করে বিধায় তাদের অন্তর্বর্তী শক্তি তুলনামূলকভাবে দুর্বল হয় (আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে তা শূন্য)। ফলে আদর্শ গ্যাস সমীকরণ দ্বারা যুক্তিসঙ্গত ফল পাওয়া যায়। উদাহরণস্বরূপ বায়ুমণ্ডলীয় বাষ্পের আংশিক চাপ 6.89 kPa/m^2 (1 psia) এর অনেক নিচে। আমরা অনেক সময় সংপৃক্ত গ্যাস (saturated gas) বললেও আসলে এতে গ্যাসের অন্যতম উপাদান অর্থাৎ বাষ্প দ্বারা সংপৃক্ততা বুঝায়। এ অবস্থায় একটি নির্দিষ্ট তাপমাত্রায় গ্যাস কোনো অতিরিক্ত বাষ্প ধরে রাখতে পারে না। তবে গ্যাসের তাপ বাড়ালে আরো বাষ্প বাড়ানো যাবে আর যদি তাপমাত্রা কমানো হয় তবে কিছু বাষ্পের ঘনীভবন হবে।

৬.৩.৩ আর্দ্রতার অনুপাত (Humidity ratio) w বলতে প্রতি kg শুষ্ক গ্যাসে বাষ্পের ভর বুঝায়,

$$W = \frac{W_v}{W_{dg}} = \frac{\rho_v}{\rho_{dg}} \longrightarrow \frac{mass_v/m^3}{mass_{dg}/m^3} \longrightarrow \frac{kg_v}{kg_{dg}}$$

এতে $\rho_{dg} = (p/RT)_{dg}$ এবং p_{dg} = partial pressure of dry gas

বাষ্পের ঘনত্ব বের করতে হলে আদর্শ গ্যাস সমীকরণ ব্যবহার করা যায়,

$$\rho = P/RT$$

$$\therefore \quad W = \frac{\rho_v}{\rho_{dg}} = \frac{(P_v)\,(R_{dg}T)}{(R_vT)\,(P_{dg})}$$

$$= \frac{P_v\,R_{dg}}{P_{dg}\,R_v} = \frac{P_v\,R_{dg}}{R_v\,(P_m - P_v)} \quad \frac{k_{gv}}{kg_{dg}}$$

$[\because P_m = P_{dg} + P_v]$

P_m = মিশ্রণের মোট চাপ

এখান থেকে,

$$\rho_v = \frac{R_v\,P_m\,W}{R_{dg} + WR_v}$$

এখানে $R_{dg} = 0.287$ kJ/kg.K এবং $R_v = 0.4615$ kJ/kg.K

অতএব $$W = \frac{P_v\,R_{dg}}{R_{dg}\,(P_m - P_v)} = \frac{0.287\,P_v}{0.4615\,(P_m - P_v)} = \frac{0.622\,P_v}{P_m - P_v}$$

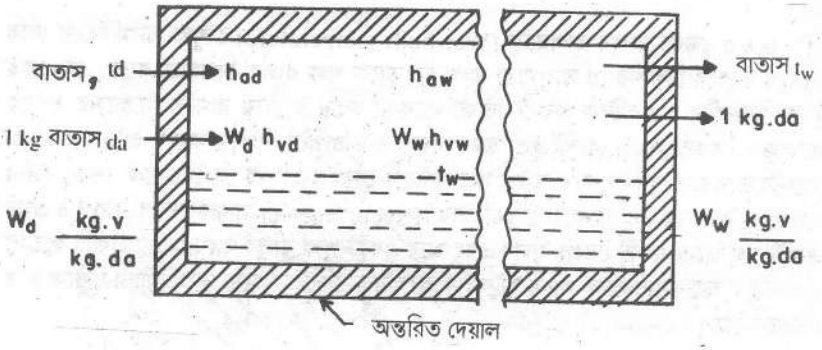
অথবা $$\rho_v = \frac{P_m\,W}{0.622 + W}$$

এটি শুধু বাতাস এবং বাষ্পের মিশ্রণের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য।

এখানে লক্ষ্য করার বিষয় এই যে, কোনো মিশ্রণ প্রক্রিয়াধীন থাকলে বাষ্পের ওজন পরিবর্তন হলেও শুষ্ক গ্যাসের ওজনের কোনো পরিবর্তন হয় না। ফলে 1 কিলোগ্রাম শুষ্ক গ্যাস এর ভিত্তিতে সমস্ত হিসাব সমাধান করা খুবই যুক্তিযুক্ত। সে অনুযায়ী মিশ্রণের ওজন হবে (1 + w) কিলোগ্রাম।

৬.৩.৪ রুদ্ধতাপীয় সংপৃক্তকরণ প্রক্রিয়া (Adiabatic saturation process) : অধিকাংশ শুষ্ককরণ অথবা আর্দ্রকরণ প্রক্রিয়ায় বাইরের কোনো উৎস থেকে তাপ সরবরাহ করা হয় না, বরং অপরিবর্তিত প্রবাহের ফলে বাতাস এবং পানি পরস্পরের মধ্যে তাপ বিনিময়ের দরুন আর্দ্রতার পরিবর্তন ঘটানো হয়। এই মিশ্রণের নিয়ন্ত্রিত আয়তন থেকে কোনো তাপ বাইরেও নেয়া হয় না। এরূপ প্রক্রিয়াকে রুদ্ধতাপীয় সংপৃক্তকরণ প্রক্রিয়া বলে।

এই প্রক্রিয়ায় মিশ্রণের মোট চাপ এর কোনো পরিবর্তন হয় না। অন্যথায় প্রক্রিয়াটি ধ্রুব চাপীয় প্রক্রিয়াও বটে।



চিত্র : ৬.৩

চিত্রে একটি অন্তরিত পাত্রে t_w তাপমাত্রায় কিছু পানি রাখা আছে। t_d তাপমাত্রায় শুষ্ক বাতাস যার আর্দ্রতার অনুপাত W_d পাত্রে প্রবেশ করছে। পাত্রের ভেতরে বাতাস ও পানি পরস্পরের মধ্যে তাপ বিনিময়ের পর প্রবাহিত বাতাস t_w তাপমাত্রায় বেরিয়ে যাচ্ছে। ধরা যাক পাত্রটি এতদূর লম্বা যাতে প্রবাহিত বাতাস এবং পানির মধ্যে তাপীয় ভারসাম্য অবস্থায় আসার যথেষ্ট অবকাশ রয়েছে। ফলে বাতাস d-তে প্রবেশ করে W-তে বের হওয়ার সময় পানি দ্বারা সম্পূর্ণভাবে সংপৃক্ত হয়ে বের হয়। অর্থাৎ পাত্রের ভেতরের পানি বাষ্পীভূত হওয়ার জন্য প্রয়োজনীয় সুপ্ত তাপ বাতাস থেকে নিয়ে t_w তাপমাত্রায় বাষ্পীভূত হয়। ফলে বাতাস ঐ তাপমাত্রায় সংপৃক্ত হয়ে w_w আর্দ্রতায় বেরিয়ে আসে এবং বাতাসের তাপমাত্রা t_d থেকে কমে t_w-তে নেমে যায়। প্রবেশ দ্বার ও নির্গমনদ্বারের শক্তি তুলনা করলে নিচের সমীকরণ পাওয়া যায়,

$$h_{ad} + W_d\, h_{vd} + (W_w - W_d)\, h_{fw} = h_{aw} + W_w.h_{vw}$$

অথবা $$W_d\,(h_{vd} - f_{fw}) = -W_w\, h_{fw} + h_{aw} - h_{ad} - W_w.h_{fw}$$

অথবা $$W_d = \frac{-W_w.h_{fw} + h_{aw} - h_{ad} + W_w.h_{vw}}{h_{vd} - h_{fw}}$$

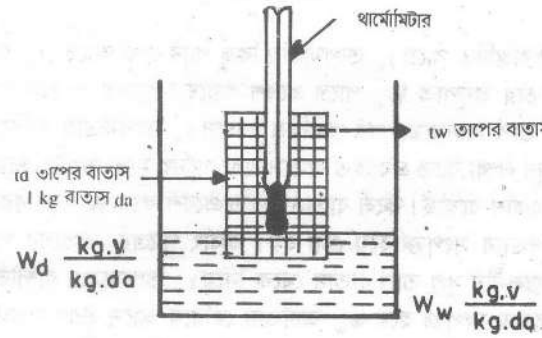
$$= \frac{W_w\,(h_{vw} - h_{fw}) + h_{aw} - h_{ad}}{h_{vd} - h_{fw}}$$

$$= \frac{W_w\, h_{fgw} + h_{aw} - h_{ad}}{h_{vd} - h_{fw}}$$ $\left[\because h_{fgw} = h_{vw} - h_{fw}\right.$ বাষ্পীভবনের সুপ্ত তাপ $\left.\right]$

$$\therefore \quad W_d = \frac{W_w\, h_{fgw} - 0.24\,(t_d - t_w)}{h_{vd} - h_{fw}}$$

[বাতাসের $C_p = 0.24$ kcal/kg.°C]

৬.৩.৫ **ভেজা বাল্‌ব তাপমাত্রা** (Wet-bulb temperature) : শুষ্ক থার্মোমিটার দিয়ে গ্যস ও বাষ্পের মিশ্রণের যে তাপমাত্রা মাপা হয় তাকে শুষ্ক বাল্‌ব তাপমাত্রা বলে। এই একই থার্মোমিটারটির বাল্‌বটিকে একটি ভিজা ন্যাকড়া দিয়ে জড়িয়ে রাখলে বাতাসের প্রবাহে ন্যাকড়ার তরল পদার্থ বাষ্পীভূত হয়। ফলে রুদ্ধতাপীয় সংপৃক্তকরণ প্রক্রিয়ার মতো থার্মোমিটারের তাপমাত্রা কমে যায়। যথাযথভাবে নেয়া হলে এই তাপমাত্রাকে ভেজা বাল্‌ব তাপমাত্রা বলা হয়। ঝুলানো সাইক্রোমিটার (Psychrometer) সাধারণভাবে ব্যবহৃত এমন একটি যন্ত্র যাতে একটি ভেজা বাল্‌ব এবং আর একটি শুষ্ক বাল্‌ব থার্মোমিটার একটি হাতলে এমনভাবে আটকানো থাকে যাতে হাতলের অক্ষের চারদিকে সহজে থার্মোমিটার দুটিকে দ্রুত ঘোরানো যায়।

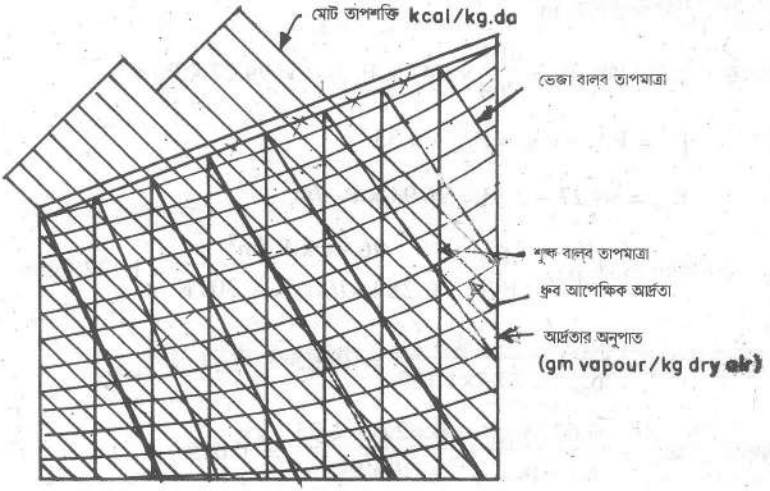


চিত্র ৬.৪ : ভেজা বাল্‌ব এর উদাহরণ।

চিত্রের ন্যাকড়ায় জলীয়বাষ্প যে পরিমাণে ঠাণ্ডা হয় অর্থাৎ $(t_d - t_w)$ কে ভেজা বাল্‌ব ডিপ্রেশন (wet-bulb depression) বলে। এই ডিপ্রেশন এবং পানির বাষ্পীভবনের হার অনেকটা নির্ভর করে বাতাসে কতটুকু জলীয়বাষ্প রয়েছে তার উপর। বাতাস যদি সম্পূর্ণভাবে পানির দ্বারা সংপৃক্ত থাকে তাহলে ন্যাকড়ার পানির কোনো বাষ্পীভবন হবে না, কারণ বাতাস অতিরিক্ত জলীয়বাষ্প ধারণ করতে অক্ষম। ফলে শুষ্ক বাল্‌ব এবং ভেজা বাল্‌ব একই তাপ দেখাবে। বাতাসে যদি কম জলীয়বাষ্প থাকে তাহলে বাষ্পীভবনের হার অধিক হবে যাতে বাতাস সম্পূর্ণভাবে সংপৃক্ত হতে পারে। এ অবস্থায় বাষ্পীভবনের হার অধিক হওয়ার দরুন ভেজা বাল্‌ব তাপমাত্রা কম দেখাবে।

তরল পদার্থ এবং বাতাসের অভিন্ন তলের মধ্যে বিদ্যমান তাপীয় ভারসাম্য অবস্থার ভেজা বাল্‌ব তাপমাত্রা অনেকগুলো বিষয়ের উপর নির্ভরশীল। সেগুলো হলো, থার্মোমিটারমুখী

তাপ বিকিরণ, থার্মোমিটার এবং বাতাসের আপেক্ষিক গতি, যন্ত্রটির নকশা, বাষ্পীভূত পানি বাতাসের প্রবাহের সাথে কিভাবে বিস্তৃত হচ্ছে তার হার, ন্যাকড়াস্থিত পানির তাপ এবং তাপ স্থানান্তরের হার। সৌভাগ্যবশত বায়ুমণ্ডলের সাধারণ অবস্থায় উল্লিখিত বিষয়গুলো কার্যকর থেকে সঠিকভাবে এমন সমতা আনয়ন করে যাতে ভেজা বাল্‌ব তাপমাত্রা রুদ্ধতাপীয় সংপৃক্তকরণ তাপের প্রায় সঠিক মান নির্দেশ করে।



চিত্র ৬.৫ : সাইক্রোমেট্রিক চার্ট।

ভেজা বাল্‌ব এবং শুষ্ক বাল্‌ব তাপমাত্রা জানা থাকলে সাইক্রোমেট্রিক চার্ট ব্যবহার করে বাতাস এবং জলীয়বাষ্পের প্রকৃত অবস্থা জানা যায় বিধায় অনেক প্রায়োগিক সমস্যার সমাধান সহজেই পাওয়া যায়। এই চার্টে বাতাসে জলীয়বাষ্পের পরিমাণ, আপেক্ষিক আর্দ্রতা এবং অন্যান্য প্রয়োজনীয় তথ্য রেখাচিত্রের মাধ্যমে অংকন করা থাকে। এসব চার্ট একটি বিশেষ মোট চাপের ভিত্তিতে আঁকা হয়। সাধারণত এটি এক বায়ুমণ্ডলীয় চাপ অর্থাৎ 101 kPa/m^2 হয়ে থাকে। বায়ুমণ্ডলীয় চাপ যদি এর চেয়ে অনেক বেশি বা কম হয় তাহলে মৌলিক তত্ত্ব থেকে সমাধান খুঁজতে হবে।তবে নবীন প্রকৌশলীর পক্ষে তার হিসাবের যথার্থতা যাচাই এর জন্য চার্ট ব্যবহার অনেক সুবিধাজনক।

উদাহরণ ৬.৩.৫.১ : বাতাসের শুষ্ক বাল্‌ব এবং ভেজা বাল্‌ব তাপমাত্রা যথাক্রমে 28°C এবং 20°C। বায়ুমণ্ডলীয় চাপ যদি ব্যারোমিটারে 747 মি.মি. দেখায়, তাহলে (a) আর্দ্রতার অনুপাত, (b) বাষ্পের আংশিক চাপ, (c) আপেক্ষিক আর্দ্রতা, (d) শিশিরাঙ্ক এবং (e) বাতাসের ঘনত্ব নির্ণয় কর।

সমাধান : $t_w = 20°C$ তাপে $h_{fgw} = 585$ k.cal/kg. এবং $h_{fw} = 19.99$ k.cal./kg.

t_d তাপে অর্থাৎ 28°C তে $h_{vd} = 608.56$ k.cal.kg

(a) $W = \dfrac{W_w\,(h_{fgw}) - 0.24\,(t_d - t_w)}{h_{vd} - h_{fw}}$

W_w বের করতে হলে 28°C তে ρ_{vw} এবং ρ_{aw} বের করতে হবে। বাষ্প সারণি (steam table) থেকে বাষ্পের পার্শ্ব চাপ $P_{vw} = 2.33$ k.pascal/m^2 এবং $v_g = 57.7 m^3/kg$.

অথবা $\rho_{vw} = \dfrac{1}{57.7}\ \dfrac{kg}{m^3}$

সংপৃক্ত বাতাসের চাপ $P_m = \dfrac{101}{760} \times 747$ k.P_a /m^2 = 99.27 k.P_a/m^2

$P_m = P_{aw} + P_{vw} = P_{aw} + 2.33$

$\therefore \quad P_{aw} = 99.27 - 2.33 = 96.94$ k.P_a /m^2

গ্যাস সমীকরণ থেকে $\rho_{aw} = \dfrac{p_{aw}}{R_a T_a} - \dfrac{96.94\ k.P_a/m^2}{0.287\ kJ/kg.K \times 301K} = 1.122\ kg/m^3$

$\therefore \quad W_w = \dfrac{\rho_{vw}}{\rho_{aw}} = \dfrac{1}{57.7 \times 1.122} = 0.015$

অথবা $W_w = \dfrac{0.622\ p_{vw}}{p_m - p_{vw}} = \dfrac{0.622 \times 2.33}{96.44} = 0.015$

অতএব $W = \dfrac{w_w\,(h_{fgw}) - 0.24\,(t_d - t_w)}{h_{vd} - h_{fw}}$

$= \dfrac{0.015 \times 585 - 0.24\,(28 - 20)}{608.56 - 19.99}$

$= \dfrac{8.775 - 1.92}{488.57} = 0.0116.$

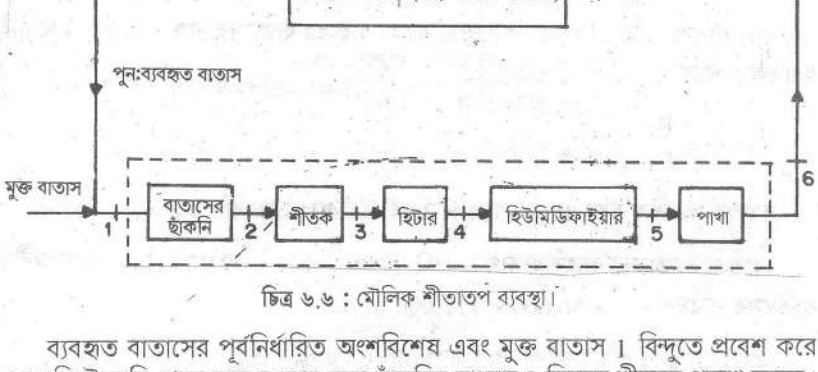
(b) বাষ্পের পার্শ্ব চাপ $P_v = \dfrac{P_m w}{0.622 + w} = \dfrac{99.94 \times 0.0116}{0.622 + 0.0116} = 1.83$ k.pascal/m^2

(c) $\varphi = \dfrac{P_v}{\text{Saturation pressure for } 28^\circ C} = \dfrac{1.83}{3.84} = 47.8\%$

(d) বাষ্পের চাপ 1.83 k.pascal/m^2 এর সংপৃক্ত তাপ (বাষ্প সারণি থেকে) 15.91°C এটিই শিশিরাঙ্ক।

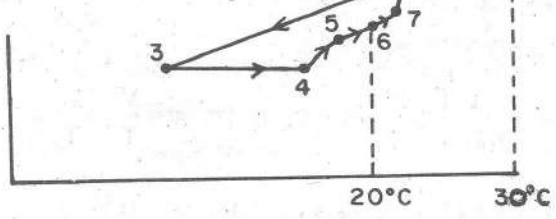
(e) বাতাসের ঘনত্ব $\rho_m = \rho_{aw} + \rho_{vw} = 1.122 + \dfrac{1}{57.7} = 1.139\ kg/m^3$

৬.৩.৬ শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ (Air conditioning) : শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা এমন একটি প্রক্রিয়া যা দ্বারা বাসস্থান, শিক্ষা প্রতিষ্ঠান, পাঠাগার, গবেষণাগার, কারখানা, জাহাজ, উড়োজাহাজ ইত্যাদিতে মানুষের জন্য আরামদায়ক এবং স্বাস্থ্যকর অথবা যন্ত্রপাতির জন্য অনুকূল পরিবেশ কৃত্রিমভাবে সৃষ্টি করা যায়। এতে সাধারণত বাতাসের তাপ, আপেক্ষিক আর্দ্রতা, প্রবাহ, গন্ধ, জীবাণু ইত্যাদি নিয়ন্ত্রণ করা হয়। উড়োজাহাজের ক্ষেত্রে অবশ্য ঊর্ধ্বে অবস্থানহেতু বাতাসের চাপ হ্রাসের দরুন ভিতরের চাপ নিয়ন্ত্রণ করা হয়। যে কোনো নিয়ন্ত্রিত শীতাতপ ব্যবস্থায় মাঝে মাঝে কামরায় ব্যবহৃত বাতাস বের করে দিয়ে বিশুদ্ধ বাতাস প্রতিস্থাপন করতে হয়। নিচে একটি ডায়াগ্রামের সাহায্যে শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা ব্যাখ্যা করা হলো।



চিত্র ৬.৬ : মৌলিক শীতাতপ ব্যবস্থা।

ব্যবহৃত বাতাসের পূর্বনির্ধারিত অংশবিশেষ এবং মুক্ত বাতাস 1 বিন্দুতে প্রবেশ করে ধুলাবালি ইত্যাদি থেকে মুক্ত হওয়ার জন্য ছাঁকনির মাধ্যমে 2 বিন্দুতে শীতকে প্রবেশ করছে। শীতকে ঠাণ্ডা হয়ে হিটারে প্রবেশ করছে। এখানে বাতাস তাপিত হয়ে আপেক্ষিক আর্দ্রতা কমে যাওয়ার দরুন এই বাতাস হিউমিডিফায়ারে পানিযুক্ত হয়ে প্রয়োজনীয় আর্দ্রতা লাভ করে। পরবর্তীতে পাখার সাহায্যে এই বাতাস নিয়ন্ত্রিত এলাকায় প্রবাহিত হবে। সেখান থেকে কিছু বাতাস বাইরে ফেলে দেয়া হয় এবং নির্দিষ্ট অংশ পুনরায় শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থায় প্রবেশ করে। এভাবে সমগ্র চক্রটি সম্পূর্ণ হয়।



চিত্র ৬.৭ : সাইক্রোমেট্রিক চার্টে শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা।

উদাহরণ ৬.৩.৬.১ : একটি ঘরের মোট আয়তন $56{,}000m^3$। ঘরের ভিতরের বাতাস $20^\circ C$ এবং আপেক্ষিক আর্দ্রতা 60% এ রাখতে হবে। ঘণ্টায় কামরার ভিতরে বাতাস দুইবার পরিবর্তন করতে হবে। বাইরের বাতাস সংপৃক্ত (100% R.H) এবং $30^\circ C$ তাপে রয়েছে। এমতাবস্থায় নিম্নলিখিত বিষয়গুলো নির্ধারণ কর :

(a) বাইরের সংপৃক্ত বাতাস ঘণ্টায় কি পরিমাণ টানতে হবে।

(b) কি পরিমাণ পানি kg/hr অপসারণ করতে হবে যাতে $20^\circ C$ তাপে আর্দ্রতা 60% থাকে।

(c) তাপ স্থানান্তরের হার kJ/hr যাতে উদ্দিষ্ট তাপ $20^\circ C$ রাখা যায়।

(d) শীতক পানি $3\theta^\circ C$ তাপে পাওয়া যাবে। বাইরের বাতাসের চাপ $101.325\ kN/m^2$ ধরা যেতে পারে।

(a) $\phi = \dfrac{P_s}{P_g} \quad \therefore\ P_s = \phi\, P_g$

$\therefore$ বাষ্পের আংশিক চাপ $P_{vap} = 0.6 \times 2.34 = 1.404\ kN/m^2$

অতএব বাতাসের আংশিক চাপ $= 101.325 - 1.404 = 99.92\ kN/m^2$ প্রয়োজনীয় বাতাসের পরিমাণ $= 2 \times 56{,}000 = 112{,}000\ m^3/hr$

প্রবেশের সময় বাতাসের আংশিক চাপ $(30^\circ C) = p_0 - p_{vap}$

$$= 101.325 - 4.246$$

$$= 97.079\ kN/m^2$$

$\therefore$ $30^\circ C$ তাপে বাতাসের পরিমাণ $= 112{,}000\ m^3/hr \times \dfrac{99.92}{97.08} \times \dfrac{303}{293}$

$$= 11{,}921\ m^3/hr \qquad \left[\because\ \frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}\right]$$

(b) (a) থেকে $20^\circ C$ তাপে অতিতাপিত বাষ্পের আংশিক চাপ $= 1.404\ kN/m^2$

অতিতাপিত বাষ্পকে আদর্শ গ্যাস ধরে

$$V = V_g \frac{T}{T_g} \left[V/T = V_g/T_g \ \because \text{ ধ্রুব চাপে } \frac{V}{T} = \frac{V_g}{T_g}\right]$$

$$\therefore \quad V = 93.8 \times \frac{293}{285} = 96.43\ m^3/kg$$

অতএব 20°C তাপে বাষ্পের ভর $= \frac{112000}{96.43} = 1161.5$ kg/hr

∴ 30°C তাপে সংপৃক্ত বাতাসের বাষ্পের ভর

$$\frac{11,921 \times 0.0135}{0.897} = 124,861 \times .0135$$

$$= 1685.6 \text{ kg/hr}$$

অতএব পানি অপসারণের পরিমাণ $= (1685.6 - 1161.5)$

$$= 524.1 \text{ kg/hr}$$

(c) আদর্শ গ্যাসের ক্ষেত্রে, $m = \frac{PV}{RT} = \frac{97.08 \times 11,921}{0.287 \times 303}$

$$= 13,308 \text{ kg/hr}$$

তাপ স্থানান্তরের পরিমাণ $= mC_p (T_2 - T_1)$

$$= 13,308 \text{ kg/hr} \times 0.24 \text{ kJ/ks } ^\circ\text{C} \times (20 - 30)$$

$$= -31939.2 \text{ kJ/hr}$$

ঋণাত্মক মান তাপ বর্জন নির্দেশ করে।

উদাহরণ ৬.৩.৬.২ : একটি শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থায় নিম্নলিখিত অবস্থায় কার্যকর থাকার জন্য নক্সা করা হয়েছে :

বাইরের অবস্থা 30°C এবং 75% আপেক্ষিক আর্দ্রতা

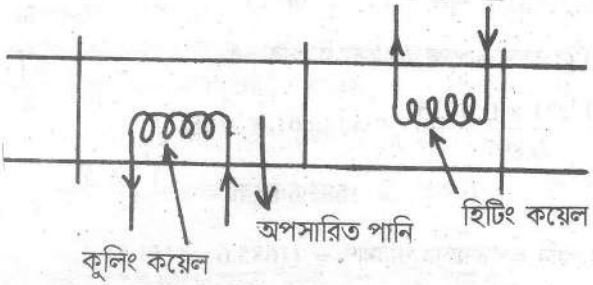
ভিতরের অবস্থা 22°C, 70% "

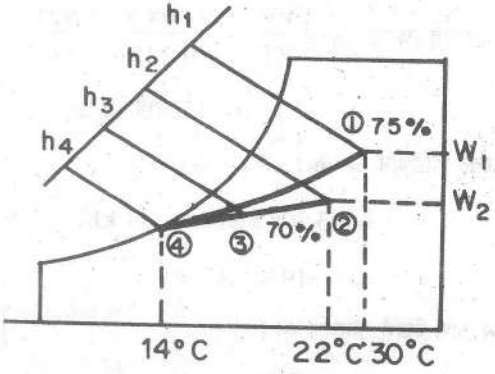
বাইরের বাতাস প্রবাহ 3.3 m^3/sec

কুলিং কয়েল শিশিরাঙ্ক – 14°C ব্যবস্থাটিতে প্রথমে কুলিং কয়েলে ঠাণ্ডা করে এবং পরবর্তীতে হিটিং কয়েলে উত্তপ্ত করে বাতাস সরবরাহ করে নিম্নলিখিত বিষয়গুলো নির্ধারণ করতে হবে : (১) কুলিং কয়েলের ক্ষমতা ; (২) হিটিং কয়েলের ক্ষমতা এবং (৩) কি পরিমাণ পানি বাতাস থেকে অপসারণ করতে হবে।

চিত্রে প্রক্রিয়াগুলো দেখানো হলো।

BANSDOC Library
Accession No. 17938





সাইক্রোমেট্রিক চার্ট থেকে

$h_1 = 82,\ h_2 = 52,\ h_3 = 47,\ h_4 = 47$ kJ/kg of dry air

$W_1 = .020,\ W_2 = W_3 = 0.9115$ kg vap/kg of dry air

বাইরের অবস্থা (30°C) বাতাসের আপেক্ষিক আয়তন $v_1 = 0.887\ m^3/kg$

অতএব শুষ্ক বাতাসের ভর $G = \dfrac{3.33}{0.887} = 3.754$ kg/sec

অতএব কুলিং কয়েলের ক্ষমতা $= G(h_1 - h_3) = 3.754\ (82 - 47)$ kJ/sec

$= 3.754 \times 35 \times 3600 = 473004$ kJ/hr Ans.

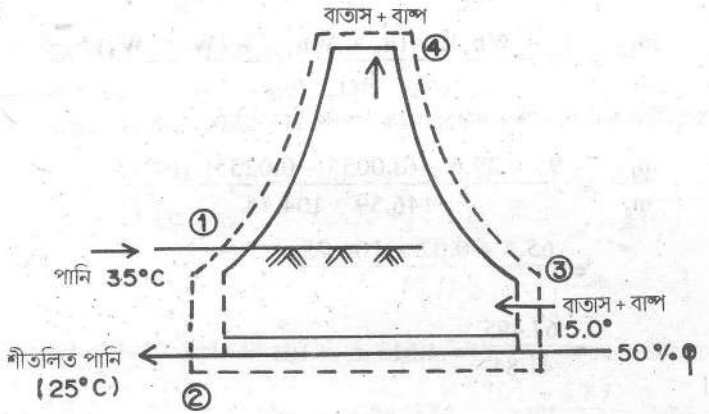
হিটিং কয়েলের ক্ষমতা $= G(h_2 - h_3) = 3.754\ (52 - 47)$ kJ/sec

$= 3.754 \times 5 = 18.77$ kw Ans.

পানি অপসারণের ওজন $= G(W_1 - W_2) = 3.754\ (.0200 - 0.0115) \times 3600$

$= 114.87$ kg/hr Ans.

উদাহরণ ৬.৩.৬.৩ : একটি কুলিং টাওয়ারে পাওয়ার প্লান্ট থেকে 35°C তাপে কনডেনসারে পানি ঢুকে শীতল হয়ে 25°C তাপে বেরিয়ে যাচ্ছে। কুলিং টাওয়ারে পানি প্রবাহের হার 682 kg/sec। বাতাস এবং জলীয়বাষ্প টাওয়ারে 15.0°C তাপে ঢুকে এবং আপেক্ষিক আর্দ্রতা 50% তে ঢুকছে এবং সংপৃক্ত হয়ে 29.0°C তাপে বেরিয়ে যাচ্ছে। টাওয়ারে শুষ্ক বাতাসের প্রবাহের হার এবং টাওয়ারে পানি যোগানোর (make up water) হার নির্ণয় কর।



সমাধান : এখানে (1) পানি টাওয়ারে ঢুকছে, (2) শীতল পানি বেরিয়ে যাচ্ছে, (3) বাতাস এবং জলীয়বাষ্প 15°C তাপে এবং 50% আপেক্ষিক আর্দ্রতায় ঢুকছে। সবশেষে (4) উষ্ণ বাতাস 29°C তাপে সংপৃক্ত হয়ে বেরিয়ে যাচ্ছে।

ভরের সংরক্ষণ সূত্র অনুসারে এবং বাতাসকে a দ্বারা বাষ্পকে v দ্বারা তরল পানি চিহ্নিত করে সংরক্ষণ সমীকরণটি,

$$m_{a,3}\, h_{a,3} + m_{v,3}\, h_{v,3} + m_{l,1}\, h_{l,1} = m_{a,4}\, h_{a,4} + m_{v,4}\, h_{v,4} + m_{l,2}\, h_{l,2}$$

এখানে $m_{a,3} = m_{a,4} = m_a$

সমান ভর দিয়ে উভয়পক্ষকে ভাগ করে

$$h_{a,3} + \frac{m_{v,3}}{m_a} h_{v,3} + \frac{m_{l,1}}{m_a} h_{l,1} = h_{a,4} + \frac{m_{v,4}}{m_a} h_{v,4} + \frac{m_{l,2}}{m_a} h_{l,2}$$

অথবা $$(h_a + Wh_v)_3 + \frac{m_{l,1}}{m_a} h_{l,1} = (h_a + Wh_v)_4 + \frac{m_{l,2}}{m_a} h_{l,2}$$

মোট পানি সংরক্ষণের সূত্রে

$$\frac{m_{l,2}}{m_a} + W_4 = \frac{m_{l,1}}{m_a} + W_3 \quad [\text{যেখানে } W = \text{আর্দ্রতার অনুপাত}]$$

$$\therefore \quad \frac{m_{l,2}}{m_a} = \frac{m_{l,1}}{m_a} + W_3 - W_4$$

$\frac{m_{l,2}}{m_a}$ এর মান বসিয়ে,

$$(h_a + Wh_v)_3 + \frac{m_{l,1}}{m_a} h_{l,1} = (h_a + Wh_v)_4 + \left(\frac{m_{l,1}}{m_a} + W_3 - W_4\right) h_{l,2}$$

অথবা $$\frac{m_{l,1}}{m_a} = \frac{(h_a + Wh_v)_4 - (h_a + Wh_v)_3 + (W_3 - W_4)\, h_{l,2}}{h_{l,1} - h_{l,2}}$$

সাইক্রামেট্রিক চার্ট ও সংশ্লিষ্ট সারণি থেকে যথাযথ মান বসিয়ে

$$\frac{m_{l,1}}{m_a} = \frac{95 - 29.6 - (0.0055 - 0.0255)\ 104.75}{146.59 - 104.75}$$

$$= \frac{65.4 + 0.02 \times 104.75}{41.84}$$

$$= \frac{67.495}{41.84} = 1.613$$

$$\therefore \quad m_a = \frac{m_{l,1}}{1.613} = \frac{682.\ kg/s}{1.613} = 422.8\ kg/sec$$

যোগানদানের পানির পরিমাণ $= \frac{m_{l,1} - m_{l,2}}{m_a} = W_4 - W_3$

অথবা $$m_{l,1} - m_{l,2} = m_a (W_4 - W_3)$$

$$= 422.8\ (.0255 - 0.0055)$$

$$= 8.456\ kg/sec$$

৬.৩.৭ আর্দ্রতার লেখচিত্র (Humidity curve) :

$$W = \frac{0.622\ P_v}{P_m - P_v}$$

সমীকরণটি মিশ্রণের আর্দ্রতা নির্দেশ করে যা শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ পদ্ধতি, কনডেনসার এবং কুলিং টাওয়ার ইত্যাদির নকশা প্রণয়ন, পরিচালনা এবং এদের কার্যকারিতা মূল্যায়নে ব্যবহৃত হয়। বাতাস যখন সম্পূর্ণভাবে জলীয়বাষ্পে সংপৃক্ত থাকে তখন বিভিন্ন তাপের জন্য বাষ্পের আংশিক চাপ বাষ্প সারণি (steam table) থেকে পাওয়া যায়। উল্লিখিত আংশিক চাপ উপরিউক্ত সমীকরণে বসিয়ে সংপৃক্ত বাতাসের জন্য বিভিন্ন তাপমাত্রায় আর্দ্রতা নির্দেশক লেখচিত্র আঁকা যায়। বলাই বাহুল্য এ ধরনের লেখচিত্রগুলো 100% আপেক্ষিক আর্দ্রতার জন্য প্রযোজ্য হবে।

আমরা জানি আপেক্ষিক আর্দ্রতা, $\varphi = \frac{P_v}{P_s}$

$$\therefore \quad W = \frac{0.622\ \phi.P_s}{P_m - \phi.P_s}$$

আপেক্ষিক আর্দ্রতার মান বসিয়ে ও অনুরূপ লেখচিত্র বিভিন্ন আর্দ্রতার জন্য আঁকা যায়।

আপেক্ষিক আর্দ্রতার সংজ্ঞা থেকে,

ϕ = কোনো নির্দিষ্ট তাপে আর্দ্রতার অনুপাত/সেই তাপে 100% আপেক্ষিক আর্দ্রতা মান বা সংপৃক্ত অবস্থায় আর্দ্রতা

$$= \frac{0.622\ \varphi P_s}{P_m - \varphi P_s} \times \frac{P_m - P_s}{0.622\ P_s} = \frac{\varphi P_s}{P_s} = \left(\frac{P_m - P_s}{P_m - \varphi P_s}\right)$$

অতএব

$$\phi = \phi\left(\frac{P_m - P_s}{P_m - \varphi P_s}\right)$$

বায়ুমণ্ডলীয় বাতাসের চাপ যদি 101 k. pascal/m^2 হয়, সে তুলনায় জলীয়বাষ্পের আংশিক চাপ মাত্র 6.87 k. pascal/m^2। এ অবস্থায় $\left(\frac{101 - 6.87}{101 - \varphi \times 6.87}\right)$ এর মান 1 ধরলে খুব বেশি ভুল হবে না।

অতএব বিভিন্ন তাপে সাইক্রোমেট্রিক চার্টে,

$$W = \frac{0.622 \times \varphi P_s}{P_m - \varphi P_s}$$

সমীকরণটি ব্যবহার করে বিভিন্ন আপেক্ষিক আর্দ্রতার জন্য ও আর্দ্রতার অনুপাত W এর লেখচিত্র আঁকা যায়।

প্রশ্নমালা

১। বাতাস এবং জলীয়বাষ্প মিশ্রণের তাপ 70°C, মোট চাপ 200 kPa, বাতাসের আংশিক চাপ 180 kPa হলে (a) শিশিরাঙ্ক, (b) আর্দ্রতার অনুপাত এবং (c) আপেক্ষিক আর্দ্রতা নির্ণয় কর। **উত্তর :** (a) 60.1°C, (b) 0.06911, (c) 64.1%

২। 20°C তাপ, 1 atm. চাপ এবং 80% আপেক্ষিক আর্দ্রতায় বাতাস এমনভাবে প্রবাহিত হচ্ছে যাতে শুষ্ক বাতাসের হার হচ্ছে 0.05 kg/s.। দ্বিতীয় আর একটি বাতাস

প্রবাহ যা 35°C তাপ, 1 atm. চাপ, 40% আপেক্ষিক আর্দ্রতায় রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়ায় প্রথমোক্ত প্রবাহের সাথে মিশ্রিত হয়ে উভয় প্রবাহ মিশ্রিত হওয়ার পর 30°C তাপে উন্নীত হলো। এ অবস্থায় (a) দ্বিতীয় প্রবাহের হার এবং (b) মিশ্রিত বাতাসের আপেক্ষিক আর্দ্রতা নির্ণয় কর। **উত্তর :** (a) 0.075 kg/s ; (b) 50.0%

৩। 35°C তাপ 65% আপেক্ষিক আর্দ্রতাসম্পন্ন বাইরের বাতাসকে 20°C তে ঠাণ্ডা করে পুন:ব্যবহৃত বাতাস যা 25°C এবং 50% আপেক্ষিক আর্দ্রতায় ছিল তার সাথে মিশ্রিত হলো। শুষ্ক বাতাসের ভরের ভিত্তিতে পুন:ব্যবহৃত বাতাস ও বাইরের বাতাসের অনুপাত 1 : 3 হলে মিশ্রিত বাতাসের আর্দ্রতার অনুপাত কত? সাইক্রোমেট্রিক চার্টে প্রক্রিয়াটি দেখাও। **উত্তর :** 0.0135.

সপ্তম অধ্যায়

প্রাপ্যতা এবং অপ্রত্যাবর্তনশীলতা

(Availability and Irreversibility)

৭.১ কার্যক্ষমতা

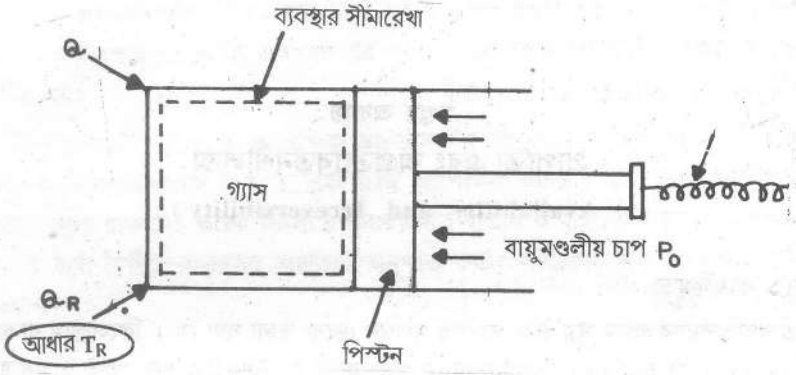
তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র এবং গ্যাসের গুণাগুণ থেকে জানা যায় যে 1 কিলোগ্রাম বাতাস 100 kPa চাপ এবং 40°C তাপমাত্রায় যে শক্তি ধারণ করে একই বাতাস একই তাপমাত্রার এবং 200 kPa চাপে সমপরিমাণ শক্তি ধারণ করে। স্বভাবতই এরূপ একটি উপসংহারে সন্দেহ থেকেই যায়। কারণ সমপরিমাণ শক্তি মজুত থাকলে ও উচ্চতর চাপের বাতাস অধিক কাজ করতে সক্ষম। ফলে উচ্চতর চাপের বাতাস বেশি মূল্যবান বলে বিবেচিত। কোনো ব্যবস্থার কার্যক্ষমতার এই ব্যবধানকে সংখ্যায় ব্যক্ত করার প্রচেষ্টা চালানো যেতে পারে।

প্রশ্ন হলো কোনো ব্যবস্থা একটি সুনির্দিষ্ট অবস্থা থেকে অন্য একটি অবস্থায় পরিবর্তিত হওয়ার সময় কি পরিমাণ কাজ করতে সক্ষম এ প্রশ্নের উত্তর দিতে হলে আরো কিছু বিষয় যেমন প্রাপ্যতা, প্রাপ্য এবং অপ্রাপ্য শক্তির অবতারণা করা প্রয়োজন। একই সাথে অপ্রত্যাবর্তনশীলতা দ্বারা অপ্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়াসমূহের ফলাফলকে সংখ্যা দ্বারা ব্যক্ত করা দরকার। প্রাপ্যতা এবং অপ্রত্যাবর্তনশীলতার একটি সরল সমীকরণ পেতে হলে সর্বোচ্চ কাজের সুস্পষ্ট অভিব্যক্তিতে আসতে হবে। যদিও প্রকৌশল পেশায় সর্বোচ্চ কাজকে সংখ্যা দ্বারা ব্যক্ত করার প্রয়োজনীয়তা কর্দাচিৎ অনুভূত হয়ে থাকে, তথাপি প্রাপ্যতার সংজ্ঞা দেয়ার জন্য একে ভিত্তি হিসেবে ব্যবহার করা যায়। প্রায়শই আমাদেরকে প্রাপ্যতা নির্ণয়ের হিসাব করতে হয়।

৭.২ সর্বোচ্চ কাজ (Maximum Works)

প্রাপ্যতা, প্রাপ্য শক্তি (energy) এবং অপ্রত্যাবর্তনশীলতা নির্ণয়ে বায়ুমণ্ডল (atmosphere) এসে যায় বলে প্রথমেই বায়ুমণ্ডলের সংজ্ঞা দেয়া প্রয়োজন। মহাশূন্যের একটি নির্দিষ্ট পরিসীমার ভেতরের একটি অঞ্চলকে একটি ব্যবস্থা (system) হিসেবে সংজ্ঞায়িত করা হয়। ব্যবস্থার পরিসীমার বাইরের প্রতিটি জিনিস পরিমণ্ডলের অন্তর্ভুক্ত। অধিকাংশ ক্ষেত্রে তাপগতিবিদ্যাজনিত ব্যবস্থার একটি অংশ হলো সমরূপ চাপ ও তাপমাত্রায় বিদ্যমান বায়ুমণ্ডল। ব্যবস্থার তুলনায় এই বায়ুমণ্ডল এত বিরাট যে ব্যবস্থার কোনো প্রক্রিয়ায় বায়ুমণ্ডলের চাপ ও তাপমাত্রার উপর কোনো প্রভাব পড়ে না। তবে ব্যবস্থার আচরণ সর্বদাই বায়ুমণ্ডল দ্বারা প্রভাবিত হয়ে থাকে।

চিত্রে একটি ব্যবস্থা এবং এর পরিমণ্ডলের উদাহরণ দেয়া গেল :



চিত্র : ৭.১

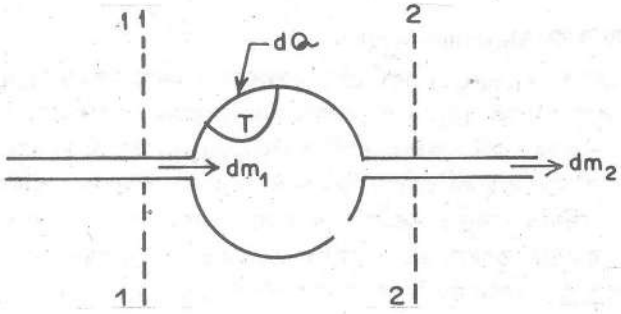
ব্যবস্থা : চোঙ্গে অবস্থিত গ্যাস।

পরিমণ্ডল : কয়েল স্প্রিং, পিস্টন, চোঙ্গ, T_R তাপমাত্রা শক্তির আধার এবং বায়ুমণ্ডল।

ব্যবস্থাটি T_R তাপে অবস্থিত শক্তির আধার এবং বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপের আদান প্রদান করে থাকে। কারণ পিস্টনের উপর স্প্রিং এর বল ও বায়ুমণ্ডলের বল উভয়েই কাজ করছে। অতএব, ব্যবস্থা কর্তৃক সম্পাদিত মোট কাজ বায়ুমণ্ডল ছাড়া পরিমণ্ডলের অন্যান্য অংশে সরবরাহকৃত কাজ এবং বায়ুমণ্ডলের উপর সম্পাদিত কাজ এই উভয় কাজের সমষ্টির সমান।

এমন একটি ব্যবস্থার সর্বোচ্চ কাজ নির্ণয় করা যাক যা শুধু বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময় করত: দশার পরিবর্তনহেতু কাজ সম্পাদন করে। বিষয়টি সাধারণভাবে আলোচনার সুবিধার্থে চিত্রে বর্ণিত একটি উন্মুক্ত ব্যবস্থার কথা ধরা যাক। এই ব্যবস্থায় অতি সামান্য পরিমাণ পরিবর্তনের দরুন dm_1 পরিমাণ বস্তু প্রবেশ করে এবং dm_2 পরিমাণ বস্তু নির্গত হচ্ছে। তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র ব্যবহার করে,

$$dQ - dw + (e_1 + p_1v_1)\, dm_1 - (e_2 + p_2v_2)\, dm_2 = dE$$



চিত্র : ৭.২

সুনির্দিষ্ট চূড়ান্ত দশাসমূহ এবং ব্যবস্থাটির অন্তর্মুখী এবং বহির্মুখী নির্দিষ্ট প্রবাহসমূহ দ্বারা প্রথম সূত্র অনুসারে শুধু (Q – W) নির্ধারণ সম্ভব। এর মধ্যে Q এবং W এর মান বিভিন্ন হতে পারে। এরূপ অবস্থায় শুধু বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময় করে সর্বোচ্চ কাজ কতটুকু হতে পারে তার উত্তর পেতে হলে দ্বিতীয় সূত্রের স্মরণাপন্ন হতে হবে। সর্বোচ্চ কাজ তখনই সম্ভব যখন ব্যবস্থাটি কোনো চক্র অনুসারে চলবে অর্থাৎ যাতে স্থায়ী পরিবর্তন না হয়।

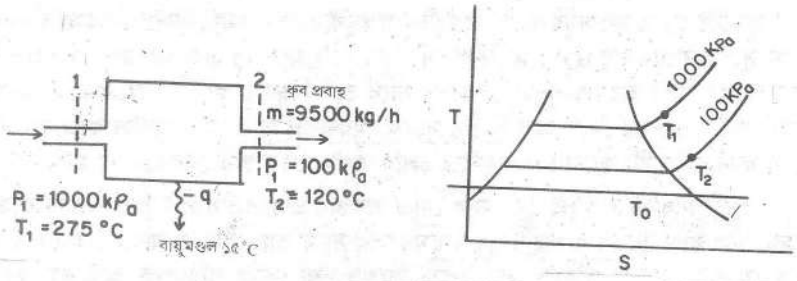
একটু অনুধাবন করলেই বুঝা যাবে যে এ অবস্থায় প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়ায় সর্বোচ্চ কাজ সম্ভব। ধরা যাক চিত্রের ব্যবস্থাটি শুধু বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময় করছে। আরো ধরা যাক যে এর সুনির্দিষ্ট পরিমাণ ভর একটি বিশেষ দশা থেকে পরিমণ্ডল অতিক্রম করে প্রাথমিক দশা i থেকে চূড়ান্ত দশা f তে রূপান্তরিত হলো। মনে করি এই অবস্থায় দশা পরিবর্তনহেতু কোনো একটি প্রক্রিয়া A সংঘটিত হওয়ায় অন্য একটি প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়া R এর চেয়ে অধিক কাজ W_A সম্পাদন করল। উল্লিখিত প্রক্রিয়া শেষে ব্যবস্থাটি প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়ায় প্রাথমিক অবস্থায় ফিরিয়ে নিলে ফিরতি প্রক্রিয়ায় পরিমণ্ডলের অংশবিশেষের সাথে প্রক্রিয়ায় যে ভর বিনিময় হয়েছিল তা প্রাথমিক দশায় ফিরে আসবে। বিপরীত প্রক্রিয়ায় কাজ সম্পাদনের পরিমাণ W_{rev} যা W_A এর চেয়ে কম। ফলে i থেকে f এবং f থেকে i পর্যন্ত দশায় যাওয়ার দরুন সম্পাদিত কাজ হলো $(W_A - W_{rev})$। এখানে শুধু বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময় ছাড়া পরিমণ্ডলের সাথে অন্য কোনো ফলাফল পরিলক্ষিত হয়নি। এটি সরাসরি দ্বিতীয় সূত্রের লঙ্ঘন। অতএব প্রস্তাবিত অনুকল্পটি (hypothesis) সত্য নয়। এ অবস্থায় উপসংহারে এভাবে বলা যায় : কোনো একটি ব্যবস্থা যদি শুধু বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময় করে এবং বায়ুমণ্ডলের সাথে নির্দিষ্ট ভরের বিনিময় দ্বারা দশার নির্দিষ্ট পরিবর্তন হয় তাহলে প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়ার মাধ্যমে সর্বোচ্চ কাজ সম্পাদন সম্ভব। এটিও বলা যায় যে, সমস্ত প্রত্যাবর্তীয় প্রক্রিয়া একই অবস্থায় সম্পাদিত হলে সম-পরিমাণ কাজ সম্পন্ন হবে।

চিত্রে যে অংশ থেকে তাপ বের হয় অথবা ভিতরে ঢুকে সে অংশের তাপমাত্রা ধরা হলো T। বায়ুমণ্ডলের তাপমাত্রা যাকে অ্যাম্বিয়েন্ট তাপমাত্রাও বলা হয় তা হলো T_0। প্রত্যাবর্তীয় পন্থায় তাপ উল্লিখিত ব্যবস্থা থেকে সরাসরি বায়ুমণ্ডলে স্থানান্তর করা যাবে না কারণ সাধারণভাবে T এবং T_0 এর মধ্যে একটি সসীম ব্যবধান রয়েছে। অপরদিকে একটি প্রত্যাবর্তীয় ইঞ্জিনের মাধ্যমে এরূপ তাপ স্থানান্তর সম্ভব। কার্নো ইঞ্জিনকে এখানে উদাহরণ হিসেবে উল্লেখ করা যায়।

উদাহরণ ৭.১ : একটি ধ্রুব প্রবাহ ব্যবস্থায় 1000 kPa চাপ এবং 275°C তাপমাত্রায় বাষ্প প্রায় শূন্য গতিতে প্রবেশ করে 100 kPa চাপ এবং 120°C তাপমাত্রায় এবং 160 m/sec গতিতে বেরিয়ে যাচ্ছে। গতি প্রবাহের হার 9500 kg/hr. বায়ুমণ্ডলের সাথে 15°C তাপমাত্রায় তাপ বিনিময় হলে সর্বোচ্চ পরিমাণ নির্ধারণ কর।

সমাধান : একটি ধ্রুব প্রবাহ (Steady flow) প্রক্রিয়ার একটি ব্যবস্থায় বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময়ের ফলে সর্বোচ্চ কাজের পরিমাণ,

$$W_{max} = h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 - T_0S_1 - (h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 - T_0S_2)$$



এখানে সম্ভাব্য শক্তির পরিবর্তন ধর্তব্য নয়— এবং প্রাথমিক গতিশক্তি হিসেবে আনার যোগ্য নয়। অতএব উপরিউক্ত সমীকরণটি নিম্নরূপে প্রকাশ করা যায়।

$$W_{max} = (h_1 - T_0S_1) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} - T_0S_2\right) = h_1 - h_2 - T_0\,(S_1 - S_2) - \frac{v_2^2}{2}$$

বাষ্পের সারণি থেকে প্রয়োজনীয় তথ্য নিয়ে,

$$Wmax = 2996.6 - 2716.3 - 288\,(7.0257 - 7.4656) - \frac{160^2}{2\,(1000)}$$

$$= 394 \text{ kJ/kg.}$$

অতএব সর্বোচ্চ কাজের পরিমাণ

$$W_{max} = \frac{9500 \text{ kg/hr} \times 394 \text{ kJ/kg}}{3600 \text{ sec/hr}} = 1040 \text{ kW}$$

প্রাপ্যতা : পূর্ববর্তী পরিচ্ছেদে সর্বোচ্চ কাজ এবং এর পরিমাণ নির্ধারণের পদ্ধতি বর্ণনা করা হয়েছে। এতে ইতোমধ্যে বলা হয়েছে যে এর কিছু পরিমাণ কাজ বায়ুমণ্ডলের উপর করা হয় বিধায় এতে কোনো কাজ সম্পাদিত হয় না। বায়ুমণ্ডলের উপর কাজ ছাড়া যা বাস্তবে কার্যকরভাবে কাজে লাগানো যায় তাকেই ব্যবহার্য (useful) কাজ বলে সংজ্ঞায়িত করা হয়। যখনই কোনো ব্যবস্থা বায়ুমণ্ডলকে চাপ দিয়ে এর আয়তন বৃদ্ধি করে তখনই কাজ সম্পাদিত হয়। এভাবে P_0 যদি বায়ুমণ্ডলের ধ্রুব চাপ হয় এবং V_i এবং V_f যদি কোনো ব্যবস্থার আদি এবং চূড়ান্ত আয়তন হয় তাহলে

$$W_{useful} = W - P_0\,(V_f - V_i)$$

লক্ষণীয় বিষয় হলো যদি $V_f < V_i$ তবে $W_{useful} > W$, এখানে W ব্যবস্থাটি কর্তৃক সম্পাদিত কাজ।

সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ প্রশ্নটি হলো– যে কোনো একটি ব্যবস্থার আদি অবস্থার জন্য বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময়ের ফলে কোনো চূড়ান্ত অবস্থার ব্যবস্থা এবং বায়ুমণ্ডলের কোনো মিশ্রণে সবচেয়ে অধিক ব্যবহার্য কাজ পাওয়া যাবে? উত্তরটি অতি সহজ। ব্যবস্থাটির চূড়ান্ত তাপমাত্রা ও চাপ যখন বায়ুমণ্ডলের তাপমাত্রা ও চাপের সমান হবে তখনই সর্বোচ্চ ব্যবহার্য কাজ পাওয়া সম্ভব। ব্যবস্থার তাপমাত্রা যদি T হয় তাহলে T_0 অর্থাৎ বায়ুমণ্ডলে

আধারের সাথে তাপ বিনিময় দ্বারা কাজ সম্পাদিত হয়। এখানে দুই অবস্থা হতে পারে। যখন $T > T_0$ এবং $T < T_0$ তাহলে প্রথমোক্ত অবস্থায় নিম্ন তাপমাত্রায় তাপ বর্জিত হয়ে হিট ইঞ্জিন চালু থাকবে যতক্ষণ পর্যন্ত না $T = T_0$ হয়। এমনকি $T = T_0$ হলে $P = P_0$ না হওয়া পর্যন্তও কাজ চালু থাকবে। কিন্তু যখন $T = T_0$ এবং $P = P_0$ তখন আর কোনো কাজ সম্ভব নয়। তখন ব্যবস্থাটি এবং বায়ুমণ্ডল সাম্যাবস্থায় চলে যাবে। একে চরম অনঢ় অবস্থা (dead state) বলা হয়। অতএব উপসংহারে বলা যায় : কোনো প্রক্রিয়া যদি এর সাহায্যে ব্যবস্থাটিকে চরম অনড় অবস্থায় নিয়ে যায় তাহলে সর্বোচ্চ কাজ পাওয়া যাবে।

প্রাপ্যতা : উপরিউক্ত অনুচ্ছেদ থেকে প্রাপ্যতার সংজ্ঞা পাওয়া যায়। যখন কোনো ব্যবস্থা এবং বায়ুমণ্ডলের মিশ্রণ এমন হবে যে ব্যবস্থাটি শুধু বায়ুমণ্ডলের সাথে তাপ বিনিময় করে ব্যবস্থাটির নির্ধারিত অবস্থা থেকে চরম অনঢ় অবস্থায় নিয়ে যায় তখন এ থেকে সর্বোচ্চ কাজ পাওয়া যায়। একেই প্রাপ্যতা বলে। লক্ষণীয় বিষয় এই যে প্রাপ্যতা ব্যবস্থাটির ধর্ম নয়। এটি নির্ভর করে P_0, T_0 এবং ব্যবস্থাটির ধর্মের উপর। অতি সূক্ষ্মভাবে বলতে গেলে ব্যবস্থা এবং বায়ুমণ্ডলের মিশ্রণকেই বলা উচিত কিন্তু বাস্তবক্ষেত্রে ব্যবস্থাটির প্রাপ্যতাই বলা হয়। এখানে T_0 এবং P_0 কে বায়ুমণ্ডলের তাপ ও চাপ বলা হয়েছে। প্রায়োগিক ক্ষেত্রে শক্তি উৎপাদন কেন্দ্র অথবা রেফ্রিজারেশন যন্ত্রের ক্ষেত্রে হ্রদ, নদী, সমুদ্র বা অন্য কোনো বড় জলাশয়ে তাপ বর্জিত হয়ে থাকে। এরূপ ক্ষেত্রসমূহে তাপ বর্জনের জলাশয়সমূহের তাপকে T_0 বলা উচিত। T_0 কে সিঙ্ক তাপমাত্রা বলা হয়। উল্লিখিত জলাশয়সমূহে তাপ বর্জিত হলে সেগুলোকে সিঙ্ক বলা হয় এবং T_0 কে সিঙ্ক তাপ বলা হয়।

প্রশ্নমালা

১। বায়ুমণ্ডলের 0°C তাপ এবং 95 kPa চাপে 20 kg বরফের প্রাপ্যতা নির্ণয় কর।

উত্তর : 367 kJ

২। হিলিয়াম গ্যাস 300 kPa চাপ এবং 200°C তাপে একটি টারবাইনে প্রবেশ করে 100 kPa এবং 150°C তাপে প্রসারিত হয়। বায়ুমণ্ডলের চাপ ও তাপ যথাক্রমে 100 kPa এবং 25°C থাকলে তাপ স্থানান্তরের পরিমাণ 7 kJ/kg। অন্তর্গামী ও বহির্গামী প্রবাহের প্রাপ্যতা এবং সর্বোচ্চ কাজ নির্ণয় কর। **উত্তর :** 867 kJ/kg, 99 kJ/kg, 768 kJ/kg.

৩। একটি সুপারহিটারে বাষ্প 7 MPa চাপ এবং 370°C তাপ এবং 33 m/sec বেগে প্রবেশ করে 6.5 MPa চাপ, 480°C তাপ এবং 45 m/sec বেগে বেরিয়ে আসে। 1400°C তাপের চুল্লি থেকে তাপ স্থানান্তরিত হচ্ছে। বায়ুমণ্ডলের চাপ 100 kPa এবং তাপ 15°C হলে এই প্রক্রিয়ায় সর্বোচ্চ কাজ নির্ণয় কর। **উত্তর :** 80.2 kJ/kg.

অষ্টম অধ্যায়

তাপগতিবিদ্যার সম্পর্ক এবং অবস্থার সমীকরণমালা

(Thermodynamic Relations and Equations of State)

৮.১ তাপগতিবিদ্যার সম্পর্ক (Thermodynamic Relations)

তাপগতিবিদ্যায় যে কোনো সিস্টেমের শুধু ঐসব গুণগত বৈশিষ্ট্যসমূহ যেগুলো প্রত্যক্ষ বা পরোক্ষভাবে পরিমেয় সেগুলোই শুধু বিবেচনা করা হয়। এতে গুরুত্বপূর্ণ ধর্মগুলো হলো, চাপ, তাপ, ঘনত্ব এবং অন্যান্য আরও এমন গুণ যা দ্বারা তাপগতীয় সিস্টেমের বিদ্যমান অবস্থাকে যথাযথভাবে চিহ্নিত করা যায়। এসব ধর্মের মান অর্থপূর্ণ হতে হলে তা হতে হবে এমনই অনন্য যে এটি শুধু বিশেষভাবে নির্দিষ্ট একক অবস্থার মান নির্দেশ করবে। তাপগতীয় ধর্মের পূর্ণাঙ্গ তালিকায় চাপ (P) এবং তাপ (T) অন্তর্ভুক্ত। কিছু ধর্ম আছে যেমন আয়তন (V) এবং ভর (M) এগুলো প্রত্যক্ষভাবে পরিমাপ করা যায়। অন্যগুলো পরিমাপের জন্য সংশ্লিষ্ট ভৌত সূত্র অথবা তাপগতীয় তত্ত্ব ব্যবহার করে পরোক্ষভাবে নির্ধারণ করা হয়। অভ্যন্তরীণ শক্তি (U) তাপ (T) এবং এনট্রপি (S) এগুলো দ্বিতীয় গ্রুপের উদাহরণ। কারণ এগুলো হলো উদ্ভূত ধর্ম এই কারণে যে তাপগতীয় সূত্রের ফলশ্রুতিতে এদের উন্মেষ। কোনো সিস্টেমের অবস্থা ভারসাম্যপূর্ণ হোক বা না-ই হোক ভর এবং আয়তন এর মতো ধর্মগুলো সব সময় একক মানসম্পন্ন। অন্য ধর্মগুলো (যেমন চাপ এবং তাপ) অনন্য মানসম্পন্ন বিদ্যমান থাকবে শুধু যখন সিস্টেমটির অবস্থা ভারসাম্যপূর্ণ। এরূপক্ষেত্রে সিস্টেমের সর্বত্র তাপগতীয় ধর্ম একই রকম বৈশিষ্ট্যপূর্ণ হবে। এ মন্তব্য সিস্টেমের সন্নিহিত পরিবেষ্টনের মধ্য হতে বাছাইকৃত পদার্থের ক্ষেত্রে সমানভাবে প্রযোজ্য। কারণ সিস্টেমের সন্নিহিত পরিবেষ্টনের অংশবিশেষের পদার্থ এবং সিস্টেমের পারস্পরিক সম্পর্ক বেশ নিবিড় হয়ে থাকে। অন্য কথায়, মূল সিস্টেমকে পরিবেষ্টনী এবং পূর্বের পরিবেষ্টনীকে নতুন সিস্টেম বলে সংজ্ঞায়িত করা হয়।

একটি ধর্মের যথাযথ সংজ্ঞা দেয়ার পর ভারসাম্যের নিয়মানুগ সংজ্ঞা দেয়া যায় এভাবে, একটি সিস্টেমের এমন একটি অবস্থা যখন ঐ সিস্টেমের ধর্মগুলোর কোনো রকম পরিবর্তনের প্রবণতা বিদ্যমান না থাকে। অন্য কথায়, একটি ভারসাম্যপূর্ণ সিস্টেমের সর্বত্র ধর্মগুলো একই মানসম্পন্ন এবং এতে পরিবর্তন আনতে হলে সিস্টেমের সীমারেখার এপার থেকে ওপার পর্যন্ত কোনো পারস্পরিক ক্রিয়ার মাধ্যমে তা আনতে হবে। বিভিন্ন ধরনের ভারসাম্য বিদ্যমান থাকতে পারে, যেমন তাপজনিত (thermal), যান্ত্রিক এবং রাসায়নিক ভারসাম্য। তাপজনিত ভারসাম্যের ক্ষেত্রে সিস্টেমের সর্বত্র একই তাপ বিদ্যমান থাকে। একটি সিস্টেমকে এর পরিবেশের সাথে তখনই ভারসাম্যপূর্ণ বলা হবে যখন এর তাপ এবং

পরিবেশের তাপ হুবহু এক। একটি যান্ত্রিক ভারসাম্যপূর্ণ সিস্টেমে এর চাপ সর্বত্র এক থাকবে এবং সময়ের সাথে এই চাপের কোনোরূপ পরিবর্তনের প্রবণতা পরিলক্ষিত হবে না। তাছাড়া যান্ত্রিক ভারসাম্যপূর্ণ সিস্টেমের ভেতরে অথবা সিস্টেম এবং পরিবেশের মাঝে কোনো রকম ভারসাম্যহীন শক্তি ক্রিয়াশীল থাকবে না। অনুরূপভাবে একটি রাসায়নিক ভারসাম্যপূর্ণ সিস্টেমের সর্বত্র একই রাসায়নিক যৌগিক দ্বারা গঠিত সুষম (homogeneous) পদার্থ বিরাজমান থাকে এবং সময়ের সাথে এই যৌগিক গঠনে কোনোরূপ পরিবর্তনের প্রবণতা থাকে না।

অতি সংক্ষেপে বলা যায় যে, তাপগতিবিদ্যার ধারণায় ভারসাম্যপূর্ণ ধর্ম এবং অবস্থার মধ্যে একটি নিবিড় সম্পর্ক বিদ্যমান। কিছু কিছু ধর্ম যেমন ভর এবং আয়তন এগুলোকে ভারসাম্যপূর্ণ এবং ভারসাম্যহীন উভয় অবস্থায় সংজ্ঞায়িত করা গেলেও অন্যান্য আরো অনেক ধর্ম আছে যেগুলোকে শুধু ভারসাম্যপূর্ণ সিস্টেমেই সংজ্ঞা দেয়া হয়। একটি সিস্টেমের ভারসাম্যপূর্ণ অবস্থার অর্থ হলো সিস্টেমের সর্বত্র প্রতিটি ধর্ম এক এবং যতক্ষণ পর্যন্ত সিস্টেমটি ভারসাম্যপূর্ণ অবস্থায় থাকে ততক্ষণ কোনো ধর্মের কোনোরূপ পরিবর্তন হয় না।

সিস্টেমের তাপগতিবিদ্যাজনিত অবস্থাকে এর তাপগতীয় ধর্মের সুনির্দিষ্ট মান উল্লেখ করে চিহ্নিত করা হয়। নীতিগতভাবে একটি সিস্টেমের অবস্থা অনন্যভাবে চিহ্নিত করতে হলে সুনির্দিষ্ট মানসম্পন্ন তাপগতীয় ধর্মের একটি পূর্ণাঙ্গ তালিকার (যেমন চাপ, তাপ এবং ঘনত্ব) প্রয়োজন হয়। তবে প্রকৌশলে যেসব পদার্থের প্রয়োজন হয় তাতে কয়েকটি ধর্ম দ্বারাই অবস্থার সংজ্ঞা দেয়া সম্ভব। বিভিন্ন ক্রিয়া বিক্রিয়ার সূত্রে এমন সব প্রায়োগিক পর্যবেক্ষণ সংরক্ষিত থাকে যাতে এসব ধর্ম এবং তাদের পরস্পরের সাথে সম্পর্ক সম্বন্ধে জানা সহজ হয়ে যায়। দুই বা ততোধিক তাপগতীয় ধর্মের পরস্পরের মধ্যকার ব্যবহারিক সম্পর্ক এই সূত্রগুলোর দ্বারা প্রতিভাত হয়। এই ব্যবহারিক সম্পর্কগুলো সূক্ষ্মভাবে জানা গেলে সামান্য কয়েকটি ধর্ম দ্বারা কোনো নির্দিষ্ট ভারসাম্যপূর্ণ অবস্থার অন্য ধর্মগুলো নির্ধারণ করা যায়। উদাহরণস্বরূপ বলা যায়, কোনো একটি বিশুদ্ধ জিনিসের ধর্ম নিয়ে কাজ করতে গেলে দুটি স্বতন্ত্র তাপগতীয় ধর্ম যেমন চাপ ও তাপই সাধারণভাবে যথেষ্ট ঐ সংনম্য খাঁটি জিনিসটির তাপগতীয় অবস্থা চিহ্নিত করতে।

৮.২ অবস্থার সমীকরণ (Equations of States)

যেসব সমীকরণ কোনো পদার্থের তাপগতীয় ধর্মগুলোর পরস্পরের সম্পর্ক নির্দেশ করে সেগুলোকে অবস্থার সমীকরণ (Equations of states) বলা হয়।

তবে কোনো বিশুদ্ধ জিনিসের সকল দশায় (phases) তাপগতীয় ধর্মের পারস্পরিক সম্পর্ক নির্দেশকারী কোনো সরল সমীকরণ নেই। তবে সর্বজনীনভাবে প্রযোজ্য কোনো সমীকরণ না থাকলেও তুলনামূলকভাবে কিছু সরল সমীকরণ রয়েছে যেগুলো পরিমণ্ডল বিশেষে বিশুদ্ধ বস্তুর ক্ষেত্রে প্রয়োগ করা যায়। এই বিশেষ পরিমণ্ডলটি হলো বিশুদ্ধ বস্তুটি মাত্র একটি দশায় (phase) থাকতে হবে। গ্যাস যদি নিম্ন চাপে এবং এর ক্রান্তি (critical) তাপের তুলনায় উচ্চ তাপে থাকে তাহলে এর জন্য যথাযোগ্য সমীকরণ রয়েছে। এরূপ

অবস্থার গ্যাসকে আদর্শ (ideal) অথবা নিখুঁত (perfect) গ্যাস বলা হয়। আসলে যে গ্যাস নিম্নবর্ণিত সমীকরণটি মেনে চলে তাকে আদর্শ গ্যাস বলে সংজ্ঞায়িত করা হয় :

$$PV = RT \qquad (৮.২.১)$$

এখানে R–কে গ্যাস ধ্রুবক বলা হয়। প্রত্যেক গ্যাসের জন্য R এর সুনির্দিষ্ট মান রয়েছে। এর একক হলো kJ/kg.K.। ঐতিহাসিকভাবে আদর্শ গ্যাস সমীকরণ PVT যা পরীক্ষা–মূলকভাবে তুলনামূলক নিম্ন চাপ এবং উচ্চ চাপে গ্যাসকে পর্যবেক্ষণ করে আবিষ্কার করা হয়েছে। তত্ত্বটি গ্যাসের গতিতত্ত্ব দ্বারাও সত্যায়িত। এই তত্ত্বে নিম্ন চাপ এবং উচ্চ তাপে আদর্শ গ্যাসের আচরণ সত্য বলে ধরে নেয়া হয়েছে।

গ্যাসের আপেক্ষিক (specific) আয়তন v কে যদি গ্যাসের মোট ভর M এবং মোট আয়তন V কে এরূপে সম্পর্কযুক্ত করা যায়,

$$v = \frac{V}{M} \qquad (৮.২.২)$$

তাহলে আদর্শ গ্যাস সমীকরণ PvT এভাবে লেখা যায়,

$$PV = MRT \qquad (৮.২.৩)$$

অ্যাভোগাড্রোর (Avogadro) সূত্র অনুসারে সমান আয়তনের বিভিন্ন গ্যাস একই তাপ ও চাপে থাকলে সমান সংখ্যক অণু (molecule) ধারণ করে। একে অণু সংখ্যা N বলে। এ সংখ্যাটি হলো 6.022×10^{23} number of moles/mole of gas. কোনো m ভর সম্পন্ন গ্যাসের আণবিক ভর (molecular mass) যদি M হয় তাহলে

$$N = \frac{m}{M} \qquad (৮.২.৪)$$

গ্যাসের মোল প্রতি আয়তন

$$\bar{v} = \frac{V}{N} \qquad (৮.২.৫)$$

সমীকরণ (৮.২.৩), (৮.২.৪) এবং (৮.২.৫) কে একত্রে লেখা যায়,

$$P\bar{v} = MRT \qquad (৮.২.৬)$$

পরীক্ষামূলক পর্যবেক্ষণ থেকে দেখা যায় MR একত্রে একটি সর্বজনীন ধ্রুবক সংখ্যা যাকে সর্বজনীন গ্যাস ধ্রুবক বলা হয়, অর্থাৎ

$$\bar{R} = MR \qquad (৮.২.৭)$$

$$\bar{R} = 8.3144 \text{ Joule/mole. K.}$$

$$= 1545 \text{ ft. lb.f/lb.mol. } ^\circ R$$

$$= 1.986 \text{ Btu/lb.mol. } ^\circ R$$

(৮.২.৬) এবং (৮.২.৭) কে একত্র করে,

$$P\bar{v} = \bar{R}T \qquad (৮.২.৮)$$

$\bar{V}$ এর মান (৮.২.৬) তে বসিয়ে

$$PV = N\bar{R}T \qquad (৮.২.৯)$$

এখানে লক্ষ্য করার বিষয় হলো PVT সূত্রটি দ্বারা আসল গ্যাসের আচরণ প্রায় যথাযথভাবে ব্যাখ্যা করা যায়। এ ধরনের অনেক সমীকরণের ব্যবহার দেখা যায়। এগুলোর মধ্যে কিছু কিছু অবস্থা বিশেষে অতি সূক্ষ্ম ফলাফল দেয় এবং অপরগুলো ব্যাপক পরিসরে তুলনামূলকভাবে কম সূক্ষ্ম। এর প্রতিটি সমীকরণ সাদামাটাভাবে পরীক্ষামূলকভাবে লব্ধ তথ্যসমূহের পারস্পরিক সম্পর্কের উপর প্রতিষ্ঠিত। এটি বলাই বাহুল্য যে, বিশেষ কোনো গ্যাসের তথ্যসমূহের সম্পর্কের উপর প্রতিষ্ঠিত সমীকরণ অন্যান্য গ্যাসের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য নয়। হয়ত এ কারণেই সর্বাবস্থায় সকল গ্যাসের জন্য প্রযোজ্য একটি যথাযথ এবং সর্বজনীন গ্যাস সমীকরণ নেই। মিশ্র গ্যাসের অধ্যায়ে আদর্শ গ্যাস এবং আসল গ্যাসের তুলনামূলক আলোচনা করে অবস্থার সমীকরণের আদর্শ গ্যাস সমীকরণের প্রয়োগ যোগ্যতা নির্ধারণ করা হবে।

৮.২.১ বাতাসের আণবিক ওজন (molecular mass) 28.96 lbm/lb.mol হলে বাতাসের গ্যাস ধ্রুবক নির্ণয় কর।

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{1545 \text{ ft. ft. lbf/lb. mol. }^\circ\text{R}}{28.96 \text{ lbm/lb. mol}}$$

$$= 53.3 \frac{\text{ft. lbf}}{\text{lbm }^\circ\text{R}}$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{1.986 \text{ Btu/lb. mol. }^\circ\text{R}}{28.96 \text{ lbm/lb. mol}}$$

$$= 0.0686 \text{ Btu/lbm }^\circ\text{R}$$

৮.২.২ পানির আণবিক ওজন 18.015 ধরে এর গ্যাস ধ্রুবক নির্ণয় কর।

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{1545 \text{ ft. ft. lbf/lb. mol. }^\circ\text{R}}{18.015 \text{ lbm/lb. mol}}$$

$$= 85.8 \text{ ft. lbf/lbm }^\circ\text{R}$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{1.986 \text{ Btu/lb. mol. }^\circ\text{R}}{18.015 \text{ lbm/lb. mol}}$$

$$= 0.110 \text{ Btu/lbm }^\circ\text{R}$$

৮.২.৩ একটি ঘরে বাতাসের মোট আয়তন 12,000 ft^3। বাতাসের চাপ ও তাপ যথাক্রমে 14.5 psia এবং 78°F হলে, বাতাসের (a) ভর (lbm) এবং (b) অণুসংখ্যা (lb mol) নির্ণয় কর।

(a) $$PV = mRT$$

$$\therefore \quad m = \frac{PV}{RT}$$

$$= \frac{14.5 \text{ lbf/in}^2 \times 144 \text{ in}^2 \times 12{,}000 \text{ ft}^3}{53.3 \frac{\text{ft.lbf}}{\text{lbm }^\circ\text{R}} \times 538^\circ\text{R}}$$

$$= 874 \text{ lbm}$$

(b) $$N = \frac{m}{M} = \frac{874 \text{ lbm}}{28.96 \text{ lbm}}$$

$$= 30.2 \text{ lb mol}$$

৮.২.৪ বাতাসের আণবিক ভর $M_{air} = 28.96 \frac{\text{lbm}}{\text{lbmol}}$ হলে বাতাসের গ্যাস ধ্রুবক R এর মান নির্ণয় কর S.I. এককে।

$$R = \frac{8.3144 \text{ kJ/kmol K}}{28.96 \frac{\text{kg}}{\text{Kmol}}}$$

$$= 0.287 \text{ kJ/kg. K}$$

৮.২.৫ বায়ুমণ্ডলীয় বাতাসের চাপ 101 KPa (Abs.) এবং তাপ 25°C হলে এর (a) ঘনত্ব এবং (b) মোলার আপেক্ষিক আয়তন নির্ণয় কর।

(a) $PV = mRT$

$$\therefore \quad \text{ঘনত্ব } \rho = \frac{m}{V}$$

$$\therefore \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT}$$

$$= \frac{101 \text{ kN/m}^2}{0.287 \text{ kNm/kgK} \times 298\text{K}}$$

$$= 1.18 \text{ kg/m}^3$$

(b) $$P\overline{V} = MRT$$

$$\therefore \quad \overline{V} = \frac{MRT}{P}$$

$$= \frac{28.96 \frac{kg}{kmol} \times 0.287 \text{ kJ/kg.K} \times 298K}{101 \text{ kN/m}^2}$$

$$= \frac{28.96 \frac{kg}{kmol} \times 0.287 \text{ kJ/kNm} \times 298K}{101 \text{ kN/m}^2}$$

$$= 24.5 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

৮.২.৬ বাষ্পের সারণি ব্যবহার করে 1000 KPa (abs.) চাপ এবং 455 K তাপে বাষ্পের (a) আপেক্ষিক আয়তন নির্ণয় কর। (b) বাষ্পের মোলার আপেক্ষিক আয়তন V এবং PV । T এর মান নির্ণয় কর।

(a) $0.196 \text{ m}^3/\text{Kg}$

(b) $\bar{v} = \frac{MRT}{P}$

$$= \frac{18.015 \frac{kg}{kmol} \times 0.4615 \text{ kNm/kgK} \times T}{1000 \text{ kN/m}^2}$$

$$= \frac{18.015 \frac{kg}{kmol} \times 0.4615 \text{ kNm/kgK} \times 455K}{1000 \text{ kN/m}^2}$$

$$= \frac{8.3144 \text{ kNm/kmol.K} \times 455K}{1000 \text{ kN/m}^2}$$

$$= 3.78 \text{ m}^3/\text{kmol.}$$

(c) $\frac{P\bar{V}}{T} = \frac{100 \text{ kN/m}^2 \times 3.78 \frac{m^3}{kmol}}{455K}$

$$= 8.31 \text{ kNm/kmol.K}$$

$$= 8.31 \text{ kJ/kmol.K}$$

৮.২.৭ একটি ঘরের দৈর্ঘ্য, প্রস্থ এবং উচ্চতা যথাক্রমে 10m, 6m এবং 4m ; ঘরের ভেতরের বাতাস 100 kPa চাপ এবং 25°C তাপে থাকলে ঘরের বাতাসের মোট ভর নির্ণয় কর।

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{100 \text{ kN/m}^2 \times 6 \times 10 \times 4 \text{m}^3}{0.287 \text{ kN.m/kg.K} \times 298K}$$

$$= 280.6 \text{ kg}$$

৮.২.৮ একটি 0.5 m^3 আয়তনবিশিষ্ট আধারে 10 kg আদর্শ গ্যাস রয়েছে। ঐ গ্যাসের আণবিক ভর 24 এবং তাপ 25°C হলে গ্যাসের চাপ নির্ণয় কর।

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$= \frac{8.3144\ kNm/kmol.K}{24\ kg/kmol}$$

$$= 0.346\ kNm/kgK$$

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

$$= \frac{10\ kg \times 0.346\ kNm/kgK \times 298K}{0.5m^3}$$

$$= 2062\ kN/m^2$$

$$= 2062\ kPa$$

৮.২.৯ একটি 0.5 ft^3 আয়তনবিশিষ্ট আধারে 20 lbm আদর্শ গ্যাস রয়েছে। ঐ গ্যাসের আণবিক ভর 24 এবং তাপ 40°F হলে গ্যাসের চাপ নির্ণয় কর।

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$= \frac{8.3144\ ft\ lbf/lb\ mol\ ^\circ R}{24\ lbm/lb\ mol}$$

$$= 64.38\ ft.\ lbf/lbm\ ^\circ R$$

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

$$= \frac{20\ lbm \times 64.38\ ft\ lbf/lb\ mol\ ^\circ R \times 540\ ^\circ R}{0.5\ ft^3}$$

$$= 46350\ lbf/ft^2 \frac{1\ ft^2}{144\ in^2}$$

$$= 322\ lbf/in^2$$

৮.২.১০ একটি 20 cm ব্যাসার্ধ এবং 1 m দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট গ্যাস সিলিন্ডার বাতাসশূন্য (evacuated) করে তাতে 25°C তাপে কার্বন ডাই-অক্সাইড গ্যাস ভর্তি করা হলো। এতে 1.2 kg গ্যাস ভরতে হলে সিলিন্ডারটির চাপ কতটে উন্নীত করতে হবে?

$$V = 0.785\,(0.2m)^2 \times 1m = 0.0314\ m^3$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$= \frac{8.3144\ kNm/kNm/kmolK}{44\ kg/kmol}$$

$$= 0.189\ kNm/kgK$$

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

$$= \frac{1.2\ kg \times 0.189\ kNm/kgK \times 298K}{0.0314 m^3}$$

$$= 2152\ kN/m^2$$

$$= 2152\ kPa$$

৮.২.১১ একটি শক্ত সিল করা পাত্রে 1kg বাষ্প 100°C তে রয়েছে। পাত্রটির মোট আয়তন $1m^3$ হলে এর (a) চাপ নির্ণয় কর। (b) পাত্রের বাষ্প গরম করে সর্বোচ্চ তাপ 200°C-তে নিতে হলে পাত্রের নিরাপত্তা ভাল্‌ভটি কত চাপে কাজ করার জন্য বসাতে হবে।

(a) $$P = \frac{mRT}{V}$$

$$= \frac{1\ kg \times 0.462\ kNm/kgK \times 373K}{1m^3}$$

$$= 156.7\ kN/m^2$$

$$= 156.7\ kPa$$

(b) $$P = \frac{1\ kg \times 0.462\ kNm/kgK \times 473K}{1m^3}$$

$$= 218.5\ kN/m^2$$

$$= 218.5\ kPa$$

প্রশ্নমালা

১। একটি 0.170 m^3 আয়তনের অনমনীয় আধার 180 kPa চাপ এবং 340°C তাপে বাষ্পে পরিপূর্ণ আছে। আধারটিকে ঠাণ্ডা করে 90°C এ নিয়ে গেলে,

(a) কত তাপে বাষ্পের দশার পরিবর্তন শুরু হবে?

(b) চূড়ান্ত চাপ কত হবে?

(c) চূড়ান্ত দশায় কত ভাগ বাষ্প পানিই থেকে যাবে?

(d) শীতলীকরণ প্রক্রিয়ায় কাজ সম্পাদনের পরিমাণ নির্ণয় কর।

উত্তর : (a) 102°C, (b) 70.1 kPa, (c) 33.7%, (d) 0

২। একটি 0.050 m^3 আয়তনের আধারে 25 kPa গেজ চাপ এবং 25°C তাপে বাতাস রয়েছে। বায়ুমণ্ডলের বাতাসের চাপ 90 kPa হলে বাতাসের ভর এবং ওজন নির্ণয় কর। মাধ্যাকর্ষণজনিত ত্বরণ 9.61 m/sec^2 ধরা যায়।

উত্তর : 0.0672 kg mass 0.646N

৩। একটি 0.15m^3 আয়তনের বাতাসের বুদবুদ 30m পানির নিচ থেকে উপরে উঠে আসলে এর আয়তন কত হবে? **উত্তর :** 0.586 m^3

৪। পটাশিয়াম 1 atm চাপে 760°C এর কাছাকাছি তাপে বাষ্পীভূত হয়। এর সংপৃক্ত তরল এবং বাষ্পের আপেক্ষিক আয়তন যথাক্রমে 0.0015 এবং 1.991 m^3/kg হলে বাষ্পের গুণগত মান 70% হলে তরল ও বাষ্পের এই মিশ্রণের আপেক্ষিক আয়তন নির্ণয় কর।

উত্তর : 1.394 m^3/kg

৫। 10 kg মিথেন 1500 kPa চাপ এবং 30°C তাপে কত বড় আয়তনের আধারে রাখা যাবে? এর তাপ 0°C তে নেমে গেলে চাপ কত হবে?

উত্তর : 1.05 m^3, 1350 kPa.

নবম অধ্যায়

জ্বালানি এবং দহন

(Fuel and Combustion)

৯.১ জ্বালানি (Fuel)

তাপগতিবিদ্যার পাঠ্যপুস্তকে জ্বালানি সম্বন্ধে বিস্তারিত আলোচনার অবকাশ নেই। তবে দহন প্রক্রিয়ায় জ্ঞান লাভের জন্য জ্বালানি সম্বন্ধে কিছুটা ধারণা থাকা বাঞ্ছনীয়। প্রধানত দুটি কারণে দহন প্রক্রিয়ায় গুরুত্ব আরোপ করা হয়। প্রথমত একজন প্রকৌশলী ব্যবহারিক ক্ষেত্রে যেসব প্রায়োগিক সমস্যা এবং যন্ত্রের সম্মুখীন হয় তাতে দহন খুবই তাৎপর্যপূর্ণ। দ্বিতীয়ত তাপগতিবিদ্যা এবং রাসায়নিক বিক্রিয়াসমূহের প্রাথমিক তত্ত্ব সম্বন্ধে সম্যক ধারণা লাভের এটি একটি অতি উত্তম মাধ্যম বলেও বিবেচিত। অধিকাংশ জ্বালানি কঠিন কয়লা, তরল অথবা গ্যাস জাতীয় হাইড্রোকার্বন এই তিনটি জ্বালানির যে কোনো একটির অন্তর্ভুক্ত। আসলে দৈনন্দিন ব্যবহারের দিক দিয়ে কয়লা, পেট্রোল, খনিজ তেল এবং প্রাকৃতিক গ্যাস খুবই পরিচিত এবং অভিন্ন জ্বালানি। উল্লিখিত সমস্ত জ্বালানিই হাইড্রোকার্বন অর্থাৎ হাইড্রোজেন (H_2) ও কার্বন (C) দ্বারা গঠিত।

৯.১.১ কয়লা : কয়লার দাহ্য উপাদানগুলো প্রধানত কার্বন, হাইড্রোজেন এবং সামান্য পরিমাণে গন্ধক (S)। কয়লায় সাধারণভাবে কিছু অদাহ্য পদার্থও থাকে যেমন নাইট্রোজেন (N_2), জলকণা (H_2O) এবং সামান্য পরিমাণে খনিজ পদার্থ। দহন প্রক্রিয়ায় শেষোক্ত পদার্থটি ভস্মে রূপান্তরিত হয়। গাছপালার স্তূপীকৃত অবশিষ্টাংশ যুগ যুগ ধরে ভূগর্ভে নিমজ্জিত থেকে ভূতাত্ত্বিক এবং জৈব রাসায়নিক বিক্রিয়ার সমন্বিত ফলে কয়লায় পরিণত হয়। জায়গাভেদে কয়লার গুণাগুণের অনেক হেরফের হয়। এমনকি একই খনিজ থেকে তোলা কয়লার গঠনের উপাদান বিভিন্ন হতে পারে। কয়লার যে কোনো নমুনার বিশ্লেষণ দুটি মূল প্রতিপাদ্য বিষয়ের বিবেচনায় যে কোনো একটির ভিত্তিতে করা হয়ে থাকে। এর একটি হলো প্রক্সিমেট (proximate) বিশ্লেষণ এবং অপরটি হলো চূড়ান্ত (ultimate) বিশ্লেষণ। প্রথমটি এর ভরের ভিত্তিতে উদ্দিষ্ট নমুনায় জলকণা, উদ্বায়ী (volatile) বস্তু, অপরিবর্তনীয় কার্বন এবং ভস্মের তুলনামূলক পরিমাণ নির্দেশ করে। দ্বিতীয়টির বিশ্লেষণের ভিত্তি একই। তবে এতে কার্বন, সালফার, হাইড্রোজেন, নাইট্রোজেন (N_2), অক্সিজেন (O_2) এবং ভস্মের তুলনামূলক পরিমাণ নির্দেশ করে। কাজেই বিশ্লেষণ যেভাবে পাওয়া গেছে (as received) সেভাবেই অথবা শুষ্ক অবস্থার ভিত্তিতে হয়ে থাকে। অন্য কথায় চূড়ান্ত বিশ্লেষণে প্রক্সিমেট বিশ্লেষণের মতো জলকণা বিবেচনায় আনা হয় না। বিশেষ বিশেষ ব্যবহারের উদ্দেশ্যে কয়লার যথাযথ মূল্যায়নের জন্য আরো অনেক গুরুত্বপূর্ণ গুণাগুণ বিবেচ্য। এর কতকগুলো

হলো এর ছাই গলে একসাথে মিশে যায় কিনা, সহজে চূর্ণ করা যায় কিনা (case of pulverization), রোদ–বৃষ্টি–ঝড়ে এর ক্ষয়ের ধরন এবং নির্দিষ্ট মাপ অনুসারে এর আকার।

৯.১.২ তেল : অধিকাংশ তরল এবং বায়বীয় হাইড্রোকার্বন জ্বালানি বিভিন্ন হাইড্রোকার্বনের মিশ্রণ। উদাহরণস্বরূপ পেট্রোল বা গ্যাসোলিন ৪০টি হাইড্রোকার্বনের মিশ্রণ যাতে সামান্য পরিমাণে অন্যান্য হাইড্রোকার্বনও রয়েছে। বেশিরভাগ তরল হাইড্রোকার্বন জ্বালানি এমন কতকগুলো হাইড্রোকার্বনের মিশ্রণ যা অশোধিত তেল পাতন এবং ক্রাকিং (cracking) প্রক্রিয়ায় শোধন করে পাওয়া যায়। এভাবে যে কোনো অশোধিত তেল থেকে বিভিন্ন ধরনের জ্বালানি পাওয়া যায়। এগুলো হলো, গ্যাসোলিন, কেরোসিন, ডিজেল এবং জ্বালানি তেল। এদের মধ্যে আবার বিভিন্ন গ্রেড (grade) বা মানের জ্বালানি রয়েছে। তরল জ্বালানি অনেক হাইড্রোকার্বনের মিশ্রণ হলেও দহন প্রক্রিয়ার জন্য এভাবে পেট্রোলকে অকটেন (Octane, C_8H_{18}) এবং ডিজেলকে ডোডিকেন (Dodecane, $C_{12}H_{20}$) হিসেবে ধরা হয়। একই উদ্দেশ্যে এরূপ জ্বালানিকে কার্বন ও হাইড্রোজেনের শতাংশ হিসেবেও উল্লেখ করা হয়।

৯.১.৩ গ্যাস (Gas) : বায়বীয় হাইড্রোকার্বনকে জ্বালানি গ্যাস বলা হয়। এর প্রধান দুটি উৎস হলো প্রাকৃতিক গ্যাস কূপ এবং বিশেষ কিছু রাসায়নিক উৎপাদন প্রক্রিয়া। প্রথমোক্ত গ্যাসের প্রধান উপাদান হলো মিথেন (Methane) এবং (Ethane) এবং রাসায়নিক সূত্র যথাক্রমে CH_4 এবং C_2H_6। শেষোক্ত গ্যাসকে সিনথেটিক গ্যাস বলা হয়। কারণ, এগুলো সাধারণত বিশেষ কিছু রাসায়নিক উৎপাদন প্রক্রিয়ায় তৈরি হয়। বলা বাহুল্য উভয় গ্যাসই হাইড্রোকার্বনের যৌগিক।

৯.২ বাংলাদেশের জ্বালানির উৎসসমূহ (Energy Resources of Bangladesh)

৯.২.১ বাংলাদেশের উৎসসমূহ : বাংলাদেশের জ্বালানির উৎসসমূহ হলো প্রাকৃতিক গ্যাস, কয়লা, তেল, পিট কয়লা, জলবিদ্যুৎ, পেশীশক্তি এবং বায়োমাস (Bio-mass) জ্বালানি। এগুলোর মধ্যে প্রাকৃতিক গ্যাস, কয়লা, তেল এবং পিট কয়লা অনবায়ণযোগ্য উৎস। অপরদিকে জলবিদ্যুৎ, পেশী শক্তি এবং বায়োমাস নবায়ণযোগ্য জ্বালানি।। প্রথমোক্ত জ্বালানি একবার ব্যবহৃত হয়ে গেলে আর নবায়ণ সম্ভব নয়। অপরদিকে নবায়নযোগ্য জ্বালানি ব্যয় হওয়ার পরও নবায়ণ করা যায়। বায়োমাস যা বাংলাদেশে প্রধান জ্বালানি উৎস তা পাওয়া যায় বৃক্ষ, কৃষিজ বর্জ্য এবং গৃহপালিত পশু থেকে। প্রকৃতি এবং গুণগত মানের প্রকারভেদে বায়োমাস মানুষ ও পশুর খাদ্য, গৃহনির্মাণ সামগ্রী, জ্বালানি এবং সার হিসেবে ব্যবহৃত হয়ে থাকে। মোট বায়োমাসের সামান্য অংশই জ্বালানিরূপে ব্যবহৃত হয়। কৃষি সম্পদের মতো বায়োমাস এর উৎপাদনও সম্পূর্ণরূপে জমির উপরে নির্ভরশীল। দেশের সর্বমোট জ্বালানির ৬০% থেকে ৮০% ভাগ আসে বায়োমাস জ্বালানি থেকে। জাতীয় জ্বালানি নীতি ১৯৯৫ এর হিসাব মতে ১৯৯০ সালে দেশের মোট প্রাথমিক জ্বালানির ৬৫.৯% এসেছে নবায়নযোগ্য জ্বালানি থেকে যার ৬৫.৫% এসেছে বায়োমাস থেকে এবং বাকি ০.৪% এসেছে জলবিদ্যুৎ

থেকে। বায়োমাস প্রধানত গৃহস্থালী কাজ যথা, রান্না বান্না এবং ধান সিদ্ধ করার জন্য ব্যবহার করা হয়। এর খুব সামান্য অংশ কৃষিজ এবং অকৃষিজ শিল্পজাত প্রক্রিয়ায় ব্যবহৃত হয়। বিদ্যুৎ উৎপাদনে এটি মোটেই ব্যবহৃত হয় না।

৯.২.২ প্রাকৃতিক গ্যাস : বাংলাদেশে প্রথম গ্যাস উত্তোলন শুরু হয় ১৯৬০ সালে ছাতক গ্যাস ক্ষেত্র থেকে। ইতোমধ্যে দেশে ২১টি (সারণি ৯.২) গ্যাস ক্ষেত্র ও একটি তেলক্ষেত্র আবিষ্কারের ফলে এই অঞ্চলে হাইড্রোকার্বন মজুদের সম্ভাবনা আরো উজ্জ্বল হয়েছে। বর্তমানে আটটি গ্যাস ক্ষেত্র বাখরাবাদ, ফেনী, হবিগঞ্জ, নরসিংদী, রশিদপুর, সিলেট ও তিতাস গ্যাস ফিল্ডের ৩৫টি কূপ থেকে দৈনিক প্রায় ৭৫০–৮০০ মিলিয়ন কিউবিক ফুট গ্যাস উত্তোলন করা হচ্ছে। এই সকল কূপের উত্তোলিত গ্যাস দেশের মধ্য ও পূর্বাঞ্চলে ১৩১৪ কি.মি. সঞ্চালন লাইন এবং ১০,০০০ কি.মি. বিতরণ লাইনের মাধ্যমে বিদ্যুৎ কেন্দ্র, সার কারখানা, শিল্প, গৃহস্থালী ও বাণিজ্যিক কাজে সরবরাহ করা হচ্ছে। এর ৮০% গ্যাসই ব্যবহৃত হয় সার তৈরি এবং বিদ্যুৎ উৎপাদনে। দেশে সার্বিক গ্যাসের চাহিদা প্রতি বছর ১৩.৪% হারে বেড়ে যাচ্ছে। বর্তমানে দেশের প্রকৃত গ্যাস চাহিদা দৈনিক প্রায় ৯৪০ মি.কি. ফুট এর স্থলে সরবরাহ হচ্ছে মাত্র ৭৫০ মি.কি. ফুট। ১৯৮০ সালে যেখানে দেশের প্রাথমিক জ্বালানির ৩৮% ভাগ মেটানো হতো গ্যাস এর মাধ্যমে সেখানে ১৯৯৭ সালে এর অংশ দাঁড়িয়েছে ৭২%। যমুনা বঙ্গবন্ধু সেতুর মাধ্যমে পশ্চিমাঞ্চলেও গ্যাস সঞ্চালন ও বিতরণের প্রকল্প নেয়া হয়েছে।

সারণি ৯.২ : বাংলাদেশের গ্যাস ক্ষেত্রসমূহ।

	Field	Natural Gas					Condensate		
		Year of Discovery	Proven+Probable (TCF)	Recoverable RCF	Cumulative Production (TCF)	Net Recoverable (TCF)	Recoverable MMBBL	Cumulative Production (TCF)	Net Rec. MMBBL
PRODUCTING									
1.	Bakhrabad	1969	1.432	0.867	0.501	0.366	2.130	0.763	1.367
2.	Feni	1981	0.432	0.080	0.036	0.044	0.243	0.087	0.156
3.	Habiganj	1963	3.669	1.895	0.567	1.328	0.100	0.028	0.073
4.	Kailash Tila	1962	3.657	2.529	0.108	2.421	27.560	1.208	26.352
5.	Narshingdi	1990	0.194	0.126	0.004	0.122	0.310	0.008	0.302
6.	Rashidpur	1960	2.242	1.309	0.080	1.229	4.00	0.108	3.982*
7.	Sylhet	1955	0.444	0.266	0.158	0.108	0.890	0.551	0.339
8.	Titas	1962	4.132	2.100	1.353	0.747	3.020	1.890	1.130
9.	Jalalabad	1989	1.500	0.900		0.900	15.750		15.75
10.	Sangu	1996	1.031	0.848		0.848			
PRODUCTION SUSPENDED									
11.	Chhatak	1959	1.900	1.140	0.027	1.113	0.080		0.080
12.	Kamta	1981	3.325	0.195	0.021	0.174	0.040		0.040

NON PRODUCING									
13.	Beani Bazar	1981	0.243	0.114		0.114	1.820		1.820
14.	Begumganj	1977	0.025	0.015		0.015	0.010		0.010
15.	Fenchuganj	1988	0.350	0.210		0.210	0.520		0.520
16.	Kutubdia	1977	0.780	0.468		0.468			
17.	Meghna	1990	0.159	0.104		0.104	0.210		0.210
18.	Semutang	1969	0.164	0.098		0.098	0.020		0.020
19.	Shahjibajar	1995	0.514	0.333		0.333			
20.	Shaldanadi	1996	0.200	0.140		0.140	0.420		0.420
21.	Bibiana		3						
22.	Sylhet Haripur		Oil field						
	Total		23.093	13.737	2.856	10.881	57.123	4.644	52.479

Source : Ministry of Energy and Mineral Resources : People's Republic of Bangladesh.

৯.২.৩ গ্যাসের ব্যবহার : বাংলাদেশের প্রাকৃতিক গ্যাসের মজুদ এবং সরবরাহ চিত্র সারণি ৯.২–তে দেখানো হয়েছে। প্রাকৃতিক গ্যাস বিদ্যুৎ উৎপাদনের জ্বালানি হিসেবে অথবা পেট্রোকেমিক্যাল সামগ্রীসমূহের কাঁচামাল হিসেবে ব্যবহৃত হবে কিনা তা নির্ভর করে এটি কি কি উপাদান দ্বারা গঠিত তার উপর। বাংলাদেশের লভ্য গ্যাস প্রধানত মিথেন দ্বারা গঠিত। ফলে এটি রাসায়নিক সার এবং মিথানল তৈরি ছাড়া বিভিন্ন পেট্রোকেমিক্যাল সম্ভার তৈরির জন্য উপযোগী নয়।

প্রাকৃতিক গ্যাস এবং অতি সাম্প্রতিককালের আবিষ্কৃত কয়লা ছাড়া বাংলাদেশে অন্য কোনো দেশজ জ্বালানি নেই। জাতীয় অর্থনীতিতে জ্বালানি আমদানির দায়ভার কমানোর উদ্দেশ্যে সরকার গত দুই দশক ধরে তেল আমদানি কমিয়ে প্রাকৃতিক গ্যাসের ব্যবহার বৃদ্ধির নীতি অব্যাহত রেখেছে। তাছাড়া জাতীয় অর্থনীতির উন্নয়নে বিদ্যুৎ ব্যবহারের গুরুত্ব বিবেচনায় এনে বিদ্যুৎ উৎপাদনে এই গ্যাসের ব্যবহার সর্বোচ্চ পর্যায়ে নিয়ে জাতীয় গ্রিডের মাধ্যমে দেশের বিভিন্ন জায়গায় বিদ্যুৎ সরবরাহের নীতি গ্রহণ করেছে। ১৯৯০ সালে যেখানে গ্যাসের মোট ব্যবহারের পরিমাণ ছিল ০.১৬৫ ট্রিলিয়ন কিউবিক ফুট সেখানে ১৯৯৩ সালে তা বেড়ে হয়েছে ০.২১ ট্রিলিয়ন কিউবিক ফুট যা ৪.৮৭ মিলিয়ন টন তেলের সমান। উপরিউক্ত পরিমাণ গ্যাসের যে ব্যবহার হয়েছে তার বিশ্লেষণ নিম্নরূপ : বিদ্যুৎ উৎপাদন ৪৪%, সার তৈরি ৩৩%, শিল্প ৭%, চা বাগান এবং ইট পোড়ানোতে ৯% এবং গৃহস্থালী ও বাণিজ্যিক ব্যবহার ৭%। জাতীয় জ্বালানি নীতিতে (১৯৯৫) দৈনিক গ্যাস উত্তোলন এর হার বাড়িয়ে ১০০০ মিলিয়ন কিউবিক ফুট করে নিম্নোক্ত হারে ব্যবহারের নীতিমালা গ্রহণ করা হয়েছে :

বিদ্যুৎ উৎপাদন	–	৪৫–৫০%
সারকারখানা	–	২৫–২৭%
শিল্প কারখানা	–	১৩–১৮%
বাণিজ্যিক ও গৃহস্থালী	–	৮–১০%

এই হারে গ্যাসের ব্যবহার হলে বর্তমানে বিদ্যমান মজুদ ২০২০ সালে শেষ হওয়ার কথা। অতিরিক্ত কোনো মজুদ আবিষ্কৃত হলে তা সেই অনুপাতে মজুদের স্থায়িত্ব বৃদ্ধি পাবে। উদাহরণস্বরূপ প্রতি ১ ট্রিলিয়ন কিউবিক ফুট গ্যাসের অতিরিক্ত মজুদের অর্থ হচ্ছে সার্বিক মজুদের স্থায়িত্ব ততমাস বৃদ্ধি। এটি অবশ্য বর্তমান ব্যবহারের হার ধরে।

এখানে উল্লেখ্য যে অপরিশোধিত তেল উত্তোলন ও পরিশোধনকালে উপজাত হিসেবে যে উচ্চতর হাইড্রোকার্বন গ্যাস পাওয়া যায় সে গ্যাসের তুলনায় পেট্রোকেমিক্যাল শিল্প প্রাকৃতিক গ্যাস কাঁচামাল হিসেবে ব্যবহার বর্তমান বিশ্বে লাভজনক বলে বিবেচিত নয়। তবে ভবিষ্যতে পর্যাপ্ত প্রাকৃতিক গ্যাস পাওয়া গেলে মিথানল তৈরির বিষয়টি বিবেচনা করা যেতে পারে।

৯.২.৪ কয়লা : দেশের তিনটি জায়গায় কয়লার সন্ধান পাওয়া গেছে : জামালগঞ্জে ১০০০ মিলিয়ন টন, বড়পুকুরিয়ায় ৩০০ মি.টন এবং খালাসপিরে ৪০০ মি.টন। জামালগঞ্জের কয়লা উত্তোলন অর্থনৈতিকভাবে এখনও লাভজনক বলে বিবেচিত হয়নি। বাণিজ্যিকভাবে লাভজনক এবং লাগসই প্রযুক্তি যা প্রয়োগে আন্তর্জাতিক বাজারে কয়লার মূল্য লাভজনক বলে বিবেচিত হবে তখনই শুধু এই কয়লা উত্তোলনের কথা বিবেচনা করা যাবে। ইতোমধ্যে কয়লাকে গ্যাসে রূপান্তরিত করা অথবা কয়লার বিভিন্ন স্তরের খাদে আটকে পড়া মিথেন গ্যাস উদ্ধার করার কোনো প্রযুক্তি উদ্ভাবিত হলে সেগুলো বিবেচনা করা যেতে পারে। বড়পুকুরিয়ার খনি থেকে কয়লা উত্তোলন মাত্র শুরু হয়েছে। তবে এর সিংহভাগ একটি ৩০০ মেগাওয়াট বিদ্যুৎ উৎপাদন কেন্দ্রের জন্য বরাদ্দ করা হয়েছে। খালাসপিরের সম্ভাব্যতা যাচাই প্রতিবেদন এখনও তৈরি হয়নি। এসব কয়লাখনি থেকে যে পরিমাণ কয়লা উত্তোলন করা হবে সেই পরিমাণ প্রাকৃতিক গ্যাসের উপর বর্তমান চাপ কমার সম্ভাবনা রয়েছে। পরিকল্পনা এমনভাবে করা হচ্ছে যাতে ২০০০ সাল থেকে বার্ষিক কয়লা উত্তোলন দশ লক্ষ টন হয়। এর অধিকাংশই বিদ্যুৎ উৎপাদনে ব্যবহৃত হবে। বর্তমানে প্রধানত ইট পোড়ানোর জন্য বছরে ২.৫ লক্ষ টন কয়লা আমদানি করা হয়। ফরিদপুর ও খুলনার নিম্ন এলাকার পিট কয়লার মজুদ পাওয়া যায়। বাংলাদেশের মোট পিট কয়লার মজুদের পরিমাণ ৬০০ মিলিয়ন টন। এই পিট কয়লা দ্বারা স্থানীয় জ্বালানির চাহিদা কিছুটা মেটানো সম্ভব। তবে পিট উত্তোলনের দরুণ কৃষি জমি এবং মৎস চাষের উপর বিরূপ প্রতিক্রিয়া পড়ার সম্ভাবনা রয়েছে। কারণ পিট উত্তোলনের দরুন উপরিউক্ত কাজগুলো ব্যাহত হবে। অতএব এ ব্যাপারে সার্বিক বিবেচনার প্রয়োজন রয়েছে।

৯.২.৫ জলবিদ্যুৎ : বাংলাদেশে জলবিদ্যুতের মোট সম্ভাব্য পরিমাণ এমন যাতে প্রতি বছর ১৫০০ গিগাওয়াট আওয়ার শক্তি উৎপাদন সম্ভব। এ থেকে কাপ্তাই জলবিদ্যুৎ কেন্দ্রে

বছরে ১০০০ গি. ওয়াট আওয়ার বিদ্যুৎ উৎপাদিত হয়ে আসছে। বিদ্যমান বাঁধের উচ্চতা বৃদ্ধি করে বর্তমানে স্থাপিত ২৩০ মেগাওয়াট কেন্দ্রের শক্তি বাড়ানোর সম্ভাবনা রয়েছে। তবে বাঁধের এই উচ্চতা বৃদ্ধিতে পরিবেশ ও প্রাণীজগতের উপর এর সম্ভাব্য প্রভাব সম্বন্ধে বিবেচনা করতে হবে। মাতামুহুরী ও সাঙ্গুর মতো ছোট ছোট সম্ভাব্য স্থানসমূহে অতিরিক্ত আরো ৫০০ গিগা ওয়াট আওয়ার বিদ্যুৎ উৎপাদনের সম্ভাবনা বিদ্যমান।

৯.২.৬ **তেল :** এ পর্যন্ত সিলেটের হরিপুরে ১.৬ মিলিয়ন টন তেলের মজুদ পাওয়া গেছে। দেশে গবাদি পশুর সংখ্যা ২.৫ মিলিয়নের মতো। জাতীয় অর্থনীতিতে এদের গুরুত্বপূর্ণ অবদান রয়েছে। গবাদি পশু, দুধ, মাংস, সার, জ্বালানি সরবরাহ এবং গাড়ি ও লাঙ্গল টানার শক্তি হিসেবে ব্যবহৃত হয়। বাংলাদেশে গড়ে প্রতিদিন প্রতি বর্গমিটারে শীতকালে ৫.০৫ কি.ওয়াট আওয়ার এবং গ্রীষ্মকালে ৮.৩৬ কি.ওয়াট আওয়ার সৌর কিরণ পতিত হয়। এভাবে সারা বাংলাদেশে প্রতি বছর যে পরিমাণ সৌর শক্তি পতিত হয় তা জ্বালানি শক্তির দিক দিয়ে ১৩০০০ কোটি টন কয়লার চেয়েও অধিক। তবে এই শক্তির ঘনত্ব অনেক কম বিধায় এটির ব্যবহার শুধু বিভিন্ন শস্য, মাছ ও কাপড় শুকানো এবং লবণ তৈরিতে সীমাবদ্ধ। সমুদ্রোপকূলে বায়ুশক্তির পর্যাপ্ত ব্যবহারের সুযোগ থাকা সত্ত্বেও একমাত্র নৌকার পালেই এটি ব্যবহৃত হয়ে আসছে। তবে বর্তমানে বায়ুশক্তির ব্যবহারের উপর গবেষণা ও উন্নয়ন কাজ চলছে।

৯.২.৭ **বায়োমাস** (Biomass) : উদ্ভিদ জগতে সালোকসংশ্লেষণের মাধ্যমে যে জৈবিক পদার্থের সৃষ্টি হয় তাকেই বায়োমাস বলা হয়ে থাকে। এর উৎস এবং ব্যবহার সম্বন্ধে ইতোমধ্যে বলা হয়েছে। সাধারণভাবে কৃষি জমি এবং অন্যান্য সকল প্রকার জমিই বায়োমাসের উৎপাদনে চূড়ান্ত উৎস হিসেবে চিহ্নিত। বাংলাদেশের মোট জমি ১৪.৩ মিলিয়ন হেক্টর থেকে ২.১৯ মিলিয়ন হেক্টর রাষ্ট্র মালিকানাধীন বন, ২.৫৭ মিলিয়ন হেক্টর কৃষি কাজের জন্য লভ্য নয় এবং ৯.৫২ মিলিয়ন হেক্টর অর্থাৎ দেশের সিংহভাগ জমি জনগণের ব্যক্তিগত সম্পত্তি যা কৃষিকাজ এবং আবাসনের জন্য ব্যবহৃত হয়। তবে শেষোক্ত প্রকার জমিতেও যথেষ্ট গাছপালার আবাদ বিদ্যমান। কাজেই মোটামুটি দেশের পুরোপুরি জমিই কোনো না কোনোভাবে বায়োমাস উৎপাদনে নিয়োজিত।

৯.৩ দহন প্রক্রিয়া (Combustion Process)

কোনো জ্বালানির গঠনকারী উপাদানগুলো যখন অক্সিজেনের সাথে যুক্ত হয়ে রাসায়নিক ক্রিয়া ঘটায় তাকে দহন প্রক্রিয়া বলে। এটি একটি রাসায়নিক ক্রিয়া বিধায় একে রাসায়নিক সমীকরণ দ্বারা প্রকাশ করা যায়। সাধারণত কিছু কিছু উপাদান বা মৌল পদার্থ পরস্পরের মধ্যে ক্রিয়া-বিক্রিয়ার মাধ্যমে এই প্রক্রিয়া ঘটায়। প্রক্রিয়াটি সংঘটিত হওয়ার পূর্বের উপাদানগুলোকে বিক্রিয়ক (reactant) এবং সংঘটিত হওয়ার পর উৎপাদিত উপাদানগুলোকে উৎপাদ (products) বলে। ভরের সংরক্ষণশীলতা সূত্রে (conservation of mass) বিক্রিয়কসমূহ এবং উৎপাদসমূহের ভর সমান। একটি রাসায়নিক সমীকরণে সর্বদা ভরের সংরক্ষণশীলতা প্রতিফলিত হয়।

কার্বনের সাথে অক্সিজেনের একটি বিক্রিয়া বিবেচনা করা যাক,

বিক্রিয়ক উৎপাদ

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad (৯.৩.১)$$

এই সমীকরণ দ্বারা এটিই বুঝায় যে, এক মোল কার্বন এক মোল অক্সিজেনের সাথে মিলিত হয়ে এক মোল কার্বন ডাই-অক্সাইড উৎপন্ন করে। অন্যভাবে এর প্রতিটির পরমাণুর (atom) ভরের বিবেচনায় 12 kg কার্বন 32 kg অক্সিজেনের সাথে মিলিত হয়ে 44 kg কার্বন ডাই-অক্সাইড উৎপন্ন করে। উল্লেখ্য, বিক্রিয়কসমূহ এবং উৎপাদসমূহের ওজন সমান। হাইড্রোকার্বন জ্বালানি পোড়ালে কার্বন এবং হাইড্রোজেন অক্সিজেনের সাথে মিলিত হয়। এই বিক্রিয়াকে জারণ বলে। নিচে মিথেন (methane) এর দহন ক্রিয়া দেখানো হলো :

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \qquad (৯.৩.২)$$

এখানে দহন ক্রিয়ার উৎপাদিত উপাদানগুলো হলো কার্বন ডাই-অক্সাইড এবং পানি। দহন প্রক্রিয়ায় উৎপাদগুলোর তাপ ও চাপের উপর নির্ভর করবে এই পানির বায়বীয়, তরল কিংবা কঠিন দশা। অধিকাংশ দহন প্রক্রিয়ায় খাঁটি অক্সিজেনের যোগান না দিয়ে বাতাস সরবরাহ করা হয়। বাতাসে আয়তনের ভিত্তিতে মোটামুটিভাবে 21% অক্সিজেন, 78% নাইট্রোজেন এবং 1% আরগন রয়েছে। সাধারণভাবে নাইট্রোজেন এবং আরগন দহনে অংশগ্রহণ করে না। তবে এই গ্যাসগুলো দহন প্রক্রিয়া শেষে অন্যান্য উৎপাদ এর তাপে নির্গত হয়। ফলে অন্যভাবে ব্যবহৃত না হলে সেই পরিমাণ তাপ শক্তি এসব গ্যাসের সাথে বেরিয়ে যায়। দহন প্রক্রিয়ায় বাতাসের আরগনকে হিসেবে না এনে বাতাসে 21% অক্সিজেন এবং 79% নাইট্রোজেন আছে বলে ধরা হয়। ওজনের ভিত্তিতে বাতাসে 23% অক্সিজেন এবং 77% নাইট্রোজেন বিদ্যমান।

উদাহরণ ৯.৩.১ : মিথেন দহন প্রক্রিয়ায় বাতাস এবং জ্বালানির অনুপাত নির্ণয় কর।

দহন সমীকরণ, $CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$

মিথেন অণুর ওজন, $(12 + 4) = 16$

সমীকরণ থেকে,

16 kg মিথেন পোড়াতে (2×32) kg অক্সিজেন প্রয়োজন

23 kg অক্সিজেন থাকে 100 kg বাতাসে

64 kg অক্সিজেন থাকে $100 \times 64/23 = 278.26$ kg বাতাস

অতএব বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত হলো, $278.26/16 = 17.39$ kg air/kg of fuel

উদাহরণ ৯.৩.২ : বায়ুমণ্ডলীয় বাতাসে মিথেন (CH_4) জ্বালানোর পর উৎপাদিত গ্যাসগুলোর বিশ্লেষণ নিম্নরূপ :

CO_2	10.0%
O_2	2.37%

CO	0.53%
N_2	87.10%

বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত নির্ণয় করে তাত্ত্বিক (theoretical) বাতাসের এটি কতভাগ তা নির্ণয় কর।

দহন সমীকরণ : $CH_4 + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + CO + O_2$

এখানে জলীয়বাষ্পকে ধরা হয়নি এবং দহন প্রক্রিয়া সম্পূর্ণ না হওয়াতে প্রোডাক্টে CO এবং O রয়েছে।

1 kg মিথেন সম্পূর্ণভাবে জ্বালালে বাতাসের প্রয়োজন হয় 17.39 kg এতে N_2 রয়েছে $0.77 \times 17.39 = 13.39$ kg

N_2 জ্বালানোতে অংশগ্রহণ করে না বিধায় সমীকরণটি নিম্নরূপ :

$$2\ CH_4 + 4.5\ O_2 \longrightarrow CO_2 + 4\ H_2O + CO + O_2$$

উল্লিখিত দহন প্রক্রিয়ায় প্রতি 32 kg মিথেন জ্বালাতে 4.5×32 kg (144 kg) O_2 সরবরাহ করা হয়েছে

$\therefore$ বাতাস সরবরাহ করা হয়েছে $(100 \times 144)/32 = 626.09$ kg

$\therefore$ প্রকৃত বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত $626.09/32 = 9.57$ kg of air/kg of fuel

অতএব, বাতাসের প্রকৃত সরবরাহ তাত্ত্বিক বাতাসের $\frac{19.57}{17.39} = 112.05\%$

উদাহরণ ৯.৩.৩ : শুষ্কভিত্তিতে একটি কয়লার নমুনার চূড়ান্ত বিশ্লেষণের ফলাফল নিম্নরূপ :

S	0.6%
H_2	5.7%
C	79.2%
O	10.0%
N_2	1.5%
Ash	3.0%

এই নমুনাটি 30% অতিরিক্ত বাতাস দ্বারা জ্বালানো হলে ভরের ভিত্তিতে বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত নির্ণয় কর।

100 Kg কয়লা ধরে হিসাব করা যাক। সমীকরণগুলো হলো :

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2$$

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

S এর জন্য O_2 প্রয়োজন $= \frac{32 \times 0.6}{32} = 0.6$ kg

H_2 এর জন্য O_2 প্রয়োজন $= \frac{32 \times 5.7}{4} = 45.6$ kg

C এর জন্য O_2 প্রয়োজন $= \frac{32 \times 79.2}{12} = 211.2$ kg

N_2 এবং Ash এর জন্য কোনো O_2 প্রয়োজন হবে না এবং জ্বালানিতে বিদ্যমান O_2 প্রয়োজনীয় O_2 থেকে বাদ দিতে হবে।

∴ 100 Kg কয়লা পোড়াতে O_2 এর প্রয়োজন হবে

$\{(0.6 + 45.6 + 211.2) - 10\} = 247.4$ kg

অতএব প্রতি কিলোগ্রাম কয়লা জ্বালাতে তাত্ত্বিক বাতাসের প্রয়োজন হবে,

$$\frac{100 \times 2.474}{23} = 10.74 \text{ kg}$$

30% অতিরিক্ত বাতাস সরবরাহ করলে বাতাস দিতে হবে

$10.74 \times 1.3 = 13.96$ kg of air/kg of fuel.

উদাহরণ ৯.৩.৪ : পেট্রোল (C_8H_{18}) O_2 এর সাথে বিক্রিয়ায় শুধু CO_2 এবং H_2O উৎপন্ন করলে প্রতি কিলোগ্রাম জ্বালানিতে প্রতিটি উৎপাদ এর পরিমাণ নির্ণয় কর।

বিক্রিয়ার সমীকরণটি হলো :

$$C_8H_{18} + 12.5\ O_2 \longrightarrow 8\ CO_2 + 9H_2O$$

$(8 \times 12 + 1 \times 18) = 114$ Kg জ্বালানিতে $(8 \times 44) = 352$ kg, CO_2 উৎপন্ন হয় এবং 144 kg জ্বালানিতে $(9 \times 18) = 162$ kg H_2O উৎপন্ন হয়।

অতএব প্রতি 1 kg জ্বালানিতে তৈরি হয় $= \frac{352}{114} = 2.09$ kg CO_2

এবং প্রতি 1 kg জ্বালানিতে তৈরি হয় $= \frac{162}{114} = 1.42$ kg H_2O

উল্লেখ্য, এখানে বিক্রিয়কসমূহের ওজন $= (114 + 12.5 \times 32) = 514$ kg

এবং উৎপাদের ওজন $= (162 + 352) = 514$ kg

অর্থাৎ বিক্রিয়কসমূহের ওজন = উৎপাদের ওজন।

উদাহরণ ৯.৩.৫ : কয়লার চূড়ান্ত বিশ্লেষণের ফলাফল নিম্নরূপ :

	C	66.0%
	S	2.0%
	H_2	56.0%
	N_2	1.5%
	O_2	9.5%
	Ash	5.0
জলীয়বাষ্প	(H_2O)	10.0

25% অতিরিক্ত বাতাস সরবরাহ করা হলে ভরের ভিত্তিতে বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত নির্ণয় কর।

100 kg কয়লা ধরে হিসাব করা যাক। সমীকরণগুলো হলো :

তিন নম্বর উদাহরণের ভিত্তিতে,

$$C \text{ এর জন্য } O_2 \text{ প্রয়োজন } = \frac{32 \times 66.0}{12} = 176.0 \text{ kg}$$

$$S \text{ এর জন্য } O_2 \text{ প্রয়োজন } = \frac{32 \times 2.0}{32} = 2.0 \text{ kg}$$

$$H_2 \text{ এর জন্য } O_2 \text{ প্রয়োজন } = \frac{32 \times 6.0}{4} = 48.0 \text{ kg}$$

অতএব, মোট O_2 প্রয়োজন $= (176 + 2 + 48 - 9.5) = 216.5$ kg

$$\text{অতএব বাতাসের পরিমাণ } = \frac{100 \times 216.5}{23} \times 1.25 = 1176.63 \text{ kg}$$

$$\therefore \text{ অতএব AF অনুপাত } = \frac{1176.63}{100} = 11.77 \text{ (with ash) kg. air/kg. fuel}$$

$$\frac{1176.63}{(100-5)} = 12.39 \text{ (Without ash) kg. air/kg fuel}$$

৯.৪ স্টইকিওমেট্রিক মিশ্রণ (Stoichiometric mixture)

জ্বালানি এবং অক্সিজেনের কোনো মিশ্রণে যদি মাত্র সেই পরিমাণ অক্সিজেনই বিদ্যমান থাকে যা দ্বারা জ্বালানির সমস্ত দাহ্যযোগ্য উপাদান সম্পূর্ণরূপে দহন করা যায় তবে সেই মিশ্রণকে স্টইকিওমেট্রিক মিশ্রণ (Stoichiometric mixture) বলে। এরূপ বিক্রিয়ায় বিদ্যমান সমস্ত কার্বন ও হাইড্রোজেন সম্পূর্ণরূপে যথাক্রমে CO_2 এবং H_2O তে রূপান্তরিত হয়। উল্লিখিত মিশ্রণে অক্সিজেনের পরিমাণ অতিরিক্তও থাকে না এবং কমও থাকে না। ফলে বিক্রিয়ার পর

কোনো মুক্ত অক্সিজেন বিদ্যমান থাকে না এবং জ্বালানির সমস্ত দাহ্য পদার্থ সম্পূর্ণরূপে অক্সিডাইজড হয়ে যায়। উদাহরণস্বরূপ C_3H_8 এর বিক্রিয়া উল্লেখ করা যায়,

$$C_3H_8 + 5O_2 \longrightarrow 3CO_2 + 4H_2O \qquad (৯.৪.১)$$

এখানে সমীকরণটির উভয়দিকে অক্সিজেন এবং দাহ্য উপাদানগুলো ভারসাম্যপূর্ণ। অতিরিক্ত কোনো অক্সিজেনও নেই। অপরদিকে সমস্ত কার্বন ও হাইড্রোজেন সম্পূর্ণরূপে রূপান্তরিত হয়ে যথাক্রমে CO_2 এবং H_2O রূপে বিদ্যমান। এরূপ বিক্রিয়াকে তাত্ত্বিক (theoretical) অথবা স্টইকিওমেট্রিক বিক্রিয়া বা দহন বলে। এখানে অতিরিক্ত অক্সিজেন বিদ্যমান থেকেও সম্পূর্ণ দহন হলে তাকে আর তাত্ত্বিক বা স্টইকিওমেট্রিক দহন বলা যাবে না। অতএব সম্পূর্ণ দহনমাত্রই শেষোক্ত দহন নয়।

স্বাভাবিকভাবেই অক্সিজেনের সরবরাহ প্রয়োজনের চেয়ে কম হলে কিংবা মিশ্রণের কোনো অসুবিধা বা অন্য কোনো কারণে সমস্ত দাহ্য পদার্থের সম্পূর্ণ দহন নাও হতে পারে। এরূপ দহনকে অসম্পূর্ণ দহন বলে। এরূপ ক্ষেত্রে C, H_2 অথবা OH দহন ক্রিয়াশেষে বিদ্যমান থেকে যায়। অপচয় কমানোর জন্য অধিকাংশ দহন ক্রিয়ায় অতিরিক্ত অক্সিজেন সরবরাহ করা হয়ে থাকে। এতে জ্বালানির সম্পূর্ণ দহন নিশ্চিত করা যায়। দহন ক্রিয়ায় বিভিন্ন অসুবিধা যথা, জ্বালানি ও বাতাসের অপর্যাপ্ত মিশ্রণ এবং সময়ের স্বল্পতার জন্য তাত্ত্বিক বিক্রিয়া ঘটানো অত্যন্ত কঠিন ব্যাপার। বেশিরভাগ প্রায়োগিক ক্ষেত্রে দহন ক্রিয়ায় প্রয়োজনীয় অক্সিজেন বাতাস দ্বারা সরবরাহ করা হয়। হিসাবের সুবিধার জন্য O_2 এবং N_2 ছাড়া বাতাসের অন্যান্য উপাদানকে বাদ দেয়া হয়। তদুপরি বাতাসকে শুষ্ক এবং আয়তনের ভিত্তিতে এটি 21% অক্সিজেন ও 79% নাইট্রোজেন দ্বারা গঠিত বলে ধরা হয়। অতএব,

$$0.21 \text{ mol } O_2 + 0.79 \text{ mol } N_2 = 1 \text{ mol air}$$

সমীকরণটি এভাবে লেখা যায়,

$$1 \text{ mol } O_2 + 3.76 \text{ mol } N_2 = 4.76 \text{ mol air}$$

উদাহরণ ৯.৪.১ : মিথেন (CH_4) এবং বাতাসের একটি স্টইকিওমেট্রিক মিশ্রণ ধরে বিক্রিয়াটির সমীকরণ নির্ধারণ কর এবং বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত নির্ণয় কর।

স্টইকিওমেট্রিক সমীকরণ

$CH_4 + a(O_2 + 3.76\ N_2) \longrightarrow b\ CO_2 + c\ H_2O + d\ N_2$ বিভিন্ন মৌলের পরমাণুর ভারসাম্য দ্বারা a, b, c এবং d বের করতে হবে।

C এর balance থেকে $b = 1$

H_2 এর balance থেকে $c = 2$

O_2 এর balance থেকে $2a = 2b + c = 4 \quad \therefore a = 2$

N_2 এর balance থেকে $2(3.76)\ a = 2d \quad \therefore d = 7.52$

অতএব স্টইকিওমেট্রিক সমীকরণটি হলো,

$$CH_4 + 2\,(O_2 + 3.76\,N_2) \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52\,N_2$$

বাতাস এবং জ্বালানির অনুপাত

AF = বাতাসের আয়তন/জ্বালানির আয়তন = 2 (4.76) mol/1 mol

= 9.52

প্রশ্নমালা

১। 130°C তাপ এবং 1 atm চাপে একটি গ্যাসীয় মিশ্রণের বিশ্লেষণ নিম্নরূপ : 80% CH_4, 14% N_2 এবং 6% H_2O। এই মিশ্রণের স্টইকিউমেট্রিক দহনে (a) এর শিশিরাঙ্ক (মিশ্রণের) এবং (b) বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত নির্ণয় কর।

উত্তর : (a) 35.6°C (b) 13.8 kg air/kg fuel

২। একটি চূর্ণ বস্তুর ভরের বিশ্লেষণে 63% C, 28% S এবং 9% ভস্ম পাওয়া গেল। এটি বাতাসে দহনের পর মোলার বিশ্লেষণে 12.3% CO_2, 4.5% O_2, 3.5% CO এবং 2.6% SO পাওয়া গেলে বাতাস এবং জ্বালানির অনুপাত নির্ণয় কর। সমস্ত C এবং S সম্পূর্ণভাবে দহনে ব্যবহৃত হয়েছে বলে ধরে নেয়া যায়।

উত্তর : 9.42 kg air/kg fuel.

৩। একটি চূড়ান্ত বিশ্লেষণে কয়লার উপাদানগুলোতে 76% C, 5% H, 6% O_2, 1% S, 1% N, 5% ভস্ম এবং 6% মুক্ত জলীয়বাষ্প পাওয়া গেল। এই কয়লা 40°C তাপে এবং 1 atm চাপে দহন করার পর আয়তনভিত্তিক বিশ্লেষণে 12.7% CO_2, 0.4% CO_2 এবং 6.1% O_2 পাওয়া গেল। কঠিন বর্জে 25% C ভস্মের গর্তে পতিত হলে (a) বাতাস ও জ্বালানির অনুপাত, (b) অতিরিক্ত বাতাসের পরিমাণ, (c) প্রতি একক ভর জ্বালানিতে CO এর ভর, (d) মিশ্রণের শিশিরাঙ্ক এবং (e) যদি দহনের জন্য সরবরাহকৃত বাতাসের আপেক্ষিক আর্দ্রতা 70% হলে মিশ্রণের শিশিরাঙ্ক নির্ণয় কর।

উত্তর : (a) 13.9 kg air/kg fuel, (b) 0.38, (c) 0.023 (d) 35.3°C (e) 46.6°C

দশম অধ্যায়

তাপগতিবিদ্যায় ব্যবহৃত কয়েকটি চক্র

তাপগতিবিদ্যায় বিভিন্ন ধরনের চক্র ব্যবহার করা হয়। এই অধ্যায়ে তাপগতিবিদ্যায় ব্যবহৃত কয়েকটি চক্র সম্পর্কে আলোচনা করা হচ্ছে।

তাপগতিবিদ্যায় ব্যবহৃত চক্রসমূহের মধ্যে কিছু চক্র রয়েছে, যেগুলো তাপকে কাজে রূপান্তরিত করে। এ ধরনের চক্র ব্যবহার করে যেসব যন্ত্র তৈরি করা হয়, সেসব যন্ত্রকে 'হিট ইঞ্জিন' নামে অভিহিত করা হয়। বর্তমান অধ্যায়ে এ ধরনের চক্র নিয়ে প্রথমেই আলোচনা করা হচ্ছে। চিত্র ১০.১–এ তাপগতিবিদ্যার কয়েকটি আদর্শ হিট ইঞ্জিন চক্রের নকশা দেখানো হলো।

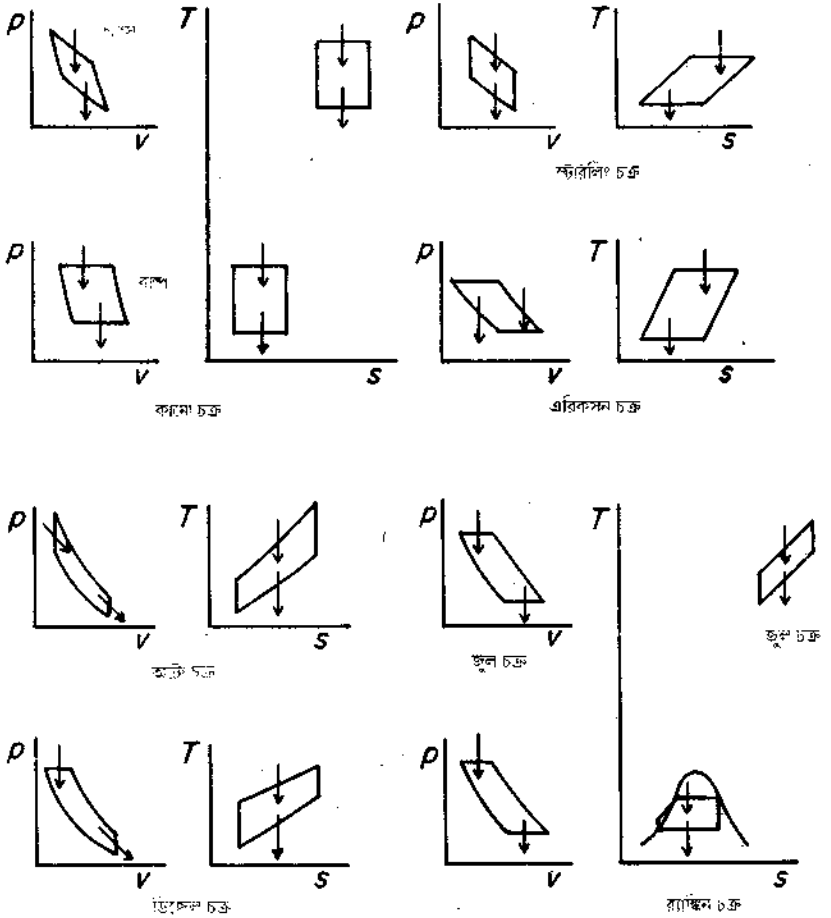
প্রতিটি চক্রে P–V চিত্র এবং T–S চিত্রে চক্রের বিভিন্ন প্রক্রিয়াগুলো দেখানো হয়েছে। পরবর্তী পর্যায়ে অন্যান্য চক্র সম্পর্কে বিশদ আলোচনা করা হবে।

হিট ইঞ্জিন ছাড়াও অন্য কয়েকটি চক্র রয়েছে, যাদের মাধ্যমে কাজ প্রয়োগ করে তাপ প্রবাহ ঘটানো হয়। এ ধরনের চক্র ব্যবহার করে যেসব যন্ত্র তৈরি করা হয়, সেসবের মধ্যে রেফ্রিজারেটর, এয়ার কন্ডিশনার ইত্যাদির নাম উল্লেখ করা যেতে পারে।

১০.১ হিট ইঞ্জিন

হিট ইঞ্জিন এমন একটি যন্ত্র যা তাপকে কাজে রূপান্তরিত করে। হিট ইঞ্জিন যন্ত্র উচ্চ তাপমাত্রার উৎস থেকে প্রথমে তাপ গ্রহণ করে, এরপর পরিপার্শ্বের উপর কাজ সম্পাদন করে এবং সর্বশেষ নিম্ন তাপমাত্রার তাপগ্রাহকে তাপ বর্জন করে।

হিট ইঞ্জিনে দুই ধরনের কার্যনির্বাহক ফ্লুইড ব্যবহার করা সম্ভব, পূর্ণ চক্র সম্পাদনের সময় একটি ফ্লুইডের দশার কোনো সময়ই পরিবর্তন হয় না এবং আদর্শ গ্যাসের ন্যায় আচরণ করে, পূর্ণ চক্র সম্পাদনের সময় কোনো এক পর্যায়ে অপর ফ্লুইডটির দশার পরিবর্তন হয়।



চিত্র ১০.১ : তাপগতিবিদ্যার কয়েকটি আদর্শ হিট ইঞ্জিন চক্র।

আদর্শ অটোচক্র (Air Standard Otto cycle)

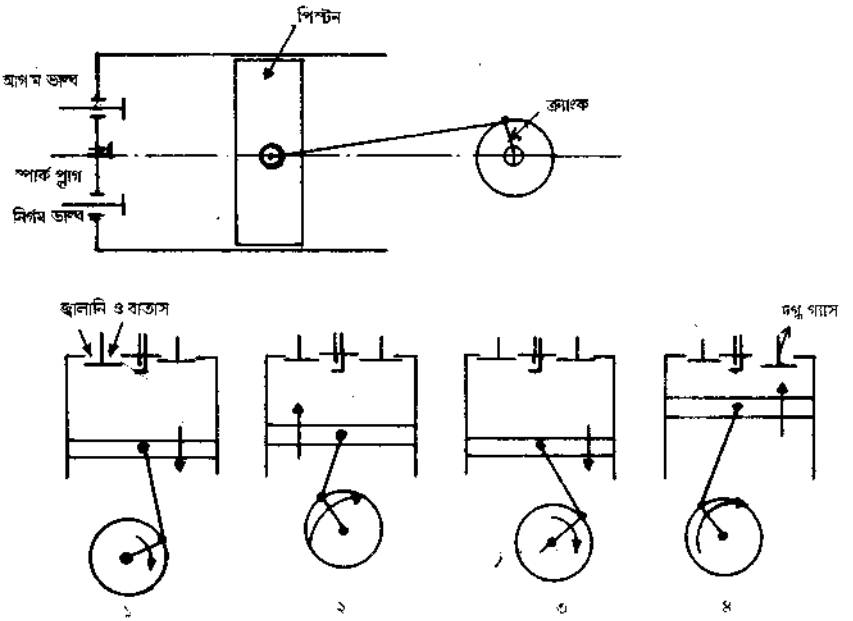
প্রথমে সেসব চক্র নিয়ে আলোচনা করা হবে, যেখানে ফ্লুইডের দশার পরিবর্তন হয় না।

রেসিপ্রোকেটিং (reciprocating) **অন্তর্দহন ইঞ্জিন** (internal combustion engine) : এ ধরনের ইঞ্জিনে একটি সিলিন্ডার এবং একটি পিস্টন থাকে। সিলিন্ডারে একদিকে একটি অগম ভালভ (inlet valve) ও একটি নির্গম ভালভ (exhaust valve) থাকে, পিস্টনটি এই সিলিন্ডারের মধ্যে সামনে পিছনে চলতে পারে। পিস্টনটি যখন সামনের সবশেষ অবস্থায় পৌঁছায় তাকে টপ ডেড সেন্টার (TDC) বলে, আবার পিস্টন সেখান থেকে

সরে এসে যখন সর্বশেষ স্থানে পৌঁছে, একে বটম ডেড সেন্টার (BDC) বলা হয় এবং সামনে থেকে সরে শেষ প্রান্ত আসার অবস্থাকে ঘাত (stroke) বলা হয়। অন্তর্দহন ইঞ্জিন চার ঘাত চক্রের (four stroke cycle) বা দুই ঘাত চক্রের (two stroke cycle) হতে পারে। এই বই এ শুধু চার ঘাত চক্রের ইঞ্জিন নিয়ে আলোচনা করা হবে।

১০.২ আদর্শ অটো চক্র (Air standard Otto cycle)

প্রথমে বাস্তব অটো চক্রের সহজ কার্যপ্রণালী বর্ণনা করা হলো। উল্লেখ করা যেতে পারে যে এই চক্রে চারটি ঘাত রয়েছে। নিচের চিত্রের সাহায্যে চক্রটি বর্ণনা করা হলো।



চিত্র ১০.২ : অটো চক্রের কার্যপ্রণালী।

১. প্রথমটি চোষণ (suction) ঘাত, ছবিতে 1–1 প্রক্রিয়া।

এই ঘাতে আগম ভাল্ভ খোলা থাকে এবং নির্গম ভাল্ভ বন্ধ থাকে, পিস্টন সামনে থেকে পিছনের দিকে সরে আসে, ফলে সিলিন্ডারের মধ্যে বায়ুর চাপ কমে যায় এবং বায়ু ও পেট্রোলের মিশ্রণ আগম ভাল্ভ দিয়ে সিলিন্ডারের মধ্যে প্রবেশ করে।

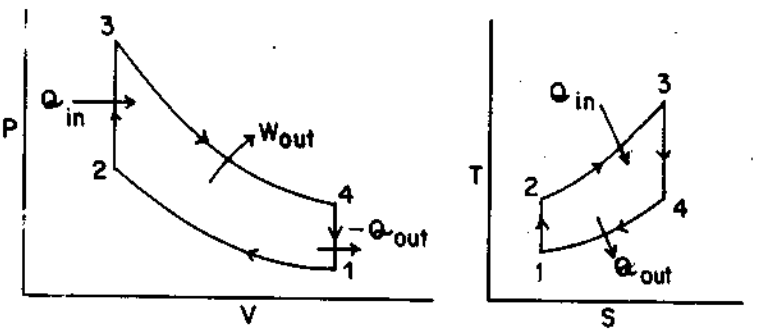
২. **সংনমন ঘাত** (Compression stroke) : এই ঘাতে আগম ও নির্গম ভাল্ভ দুটিই বন্ধ থাকে এবং পিস্টন সামনের দিকে যেতে থাকে। ফলে বায়ু ও পেট্রোলের মিশ্রণকে সংকুচিত করে। ক্রমে মিশ্রণের চাপ ও তাপমাত্রা উভয়েই বাড়তে থাকে। পিস্টন সম্পূর্ণভাবে

সামনে পৌঁছানোর কিছু আগে বিদ্যুৎ স্ফুলিঙ্গের সাহায্যে মিশ্রণে বিস্ফোরণ ঘটানো হয় এবং চাপ ও তাপমাত্রা উভয়েই বৃদ্ধি পায়।

৩. **কার্যঘাত** (Working stroke) : এই ঘাতে দুটি ভাল্‌ভই বন্ধ থাকে এবং সৃষ্ট চাপে পিস্টন পিছনে সরে আসে এবং বিভিন্ন লিঙ্কের মাধ্যমে ইঞ্জিন পরিপার্শ্বের উপর কার্য সম্পাদন করে।

৪. **নিষ্কাশন ঘাত** (Exhaust stroke) : এই ঘাতে আগম ভাল্‌ভ বন্ধ থাকে। পিস্টনটি সিলিন্ডারের সামনের দিকে যেতে থাকে এবং দগ্ধ গ্যাসকে নির্গম ভাল্‌ভ দিয়ে ঠেলে সিলিন্ডার থেকে বের করে দেয়। এ ঘাত শেষ হবার পর একটি চক্র পূর্ণ হয়। এরপর নতুন চক্র আরম্ভ হয়।

অটো চক্রের উপরিউক্ত প্রক্রিয়ার বিশ্লেষণ দুরূহ, এই চক্রকে তাপগতিবিদ্যার বিভিন্ন পর্যালোচনাও বিশ্লেষণের জন্য **আদর্শ** চক্র হিসেবে বিবেচনা করা হয় এবং বায়ুকে কার্যকর ফ্লুইড হিসেবে ধরা হয়। চক্রের **বিভিন্ন** পর্যায়ে তাপ প্রয়োগ ও বর্জন করা হয় এবং পরিপার্শ্বের উপর কাজ সম্পাদিত হয়। চক্রটি ছবিতে দেখানো হলো।



চিত্র ১০.৩ : আদর্শ অটো চক্র।

চক্রটির বর্ণনা নিম্নরূপ :

1–2 প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপে সংনমন (reversible adiabatic compression)

2–3 ধ্রুব আয়তনে তাপ প্রয়োগ (Constant volume heat addition)

3–4 প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপে প্রসারণ (reversible adiabatic expansion)

4–1 ধ্রুব আয়তনে তাপ বর্জন (constant volume heat rejection)

সহজ বিশ্লেষণের জন্য এটিকে একটি অপ্রবাহিত প্রক্রিয়া হিসেবে বিবেচনা করা হয়।

এই চক্রের দক্ষতা

$$\eta_0 = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

$$= 1 - \frac{mC_v (T_4 - T_1)}{mC_v (T_3 - T_2)}$$

প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপ প্রক্রিয়ার জন্য

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \frac{T_1}{T_2}$$

উপরের সমীকরণ থেকে

$$\eta_0 = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$$

$$r_v = \frac{v_4}{v_3}$$

r_v-কে সংনমনের অনুপাত বলা হয়।

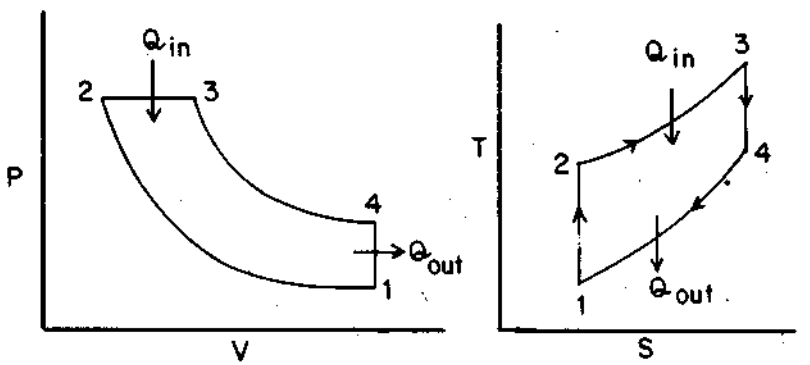
লক্ষ্য করা যায় যে, আদর্শ অটো চক্রের দক্ষতা শুধু সংনমনের অনুপাতের উপর নির্ভরশীল।

কার্যকর গড় চাপ (Mean effective pressure, MEP) বলতে সেই চাপ বুঝায় যা পিস্টনের উপর কার্যকর থেকে একটি সংনমনে সমপরিমাণে কাজ দিবে।

$$W = P_{MEP}\,(V_{BDC} - V_{TDC})$$

১০.৩ ডিজেল চক্র

একটি ডিজেল চক্র চারঘাত এ সম্পন্ন হয়। প্রথমে ডিজেল চক্রের বাস্তব প্রক্রিয়া আলোচনা করা হবে এবং পরে আদর্শ ডিজেল চক্রের বিভিন্ন দিক বিশ্লেষণ করা হবে।



চিত্র ১০.৪ : ডিজেল চক্র।

১. **প্রথমটি চোষণ ঘাত** (Suction stroke) : এই ঘাতে আগম ভাল্‌ভ খোলা থাকে এবং নির্গম ভাল্‌ভ বন্ধ থাকে এবং পিস্টন সামনে থেকে পিছনের দিকে সরে আসে, ফলে সিলিন্ডারের মধ্যে বায়ুর চাপ কমে যায় এবং শুধু বায়ু আগম ভাল্‌ভ দিয়ে সিলিন্ডারের মধ্যে প্রবেশ করে (চিত্র ১০.৪)।

২. **সংনমন ঘাত** (Compression stroke) : এই ঘাতে আগম ও নির্গম ভাল্‌ভ দুটিই বন্ধ থাকে এবং পিস্টন সামনের দিকে যেতে থাকে। ফলে বায়ু সংকুচিত হয় এবং এর চাপ ও তাপমাত্রা উভয়েই বৃদ্ধি পায়। পিস্টন সম্পূর্ণভাবে সামনে পৌঁছানোর কিছু আগে ইনজেকটরের সাহায্যে সিলিন্ডারের মধ্যে ডিজেল তেল স্প্রে আরম্ভ করা হয়। চাপে ও তাপে তেল প্রজ্বলিত হয় এবং চাপ ও তাপমাত্রা আরো বৃদ্ধি পায়।

৩. **কার্যের ঘাত** (Working stroke) : এই ঘাতের সময় আগম ও নির্গম ভাল্‌ভ দুটিই বন্ধ থাকে এবং সৃষ্ট চাপে পিস্টন পিছনের দিকে সরে আসে এবং বিভিন্ন লিঙ্কের মাধ্যমে ইঞ্জিন পরিপার্শ্বের উপর কাজ করে।

৪. **নিষ্কাশন ঘাত** (Exhaust stroke) : এই ঘাতে আগম ভাল্‌ভ বন্ধ থাকে এবং নির্গম ভাল্‌ভ খোলা থাকে। পিস্টন সিলিন্ডারের সামনের দিকে যেতে থাকে এবং দগ্ধ গ্যাসকে নির্গম ভাল্‌ভ দিয়ে ঠেলে বের করে দেয়। এই ঘাত শেষ হবার পর একটি চক্র পূর্ণ হয়।

এরপর নতুন আর একটি চক্র শুরু হয়।

ডিজেল চক্রের উপরিউক্ত প্রক্রিয়া বিশ্লেষণ কঠিন। এই চক্রকে সহজ করার জন্য একটি আদর্শ গ্যাস বায়ুকে একটি বন্ধ ব্যবস্থার মাধ্যমে কার্যকর ফ্লুইড হিসেবে ধরা হয়। বিভিন্ন পর্যায়ে তাপ প্রয়োগ ও বর্জন করা হয় এবং পরিপার্শ্বের উপর কাজ সম্পাদিত হয়। চক্রটি ছবিতে দেখানো হলো। সহজ বিশ্লেষণের জন্য এটিকে একটি অপ্রবাহিত প্রক্রিয়া হিসেবে বিবেচনা করা হয় (চিত্র ১০.৪)।

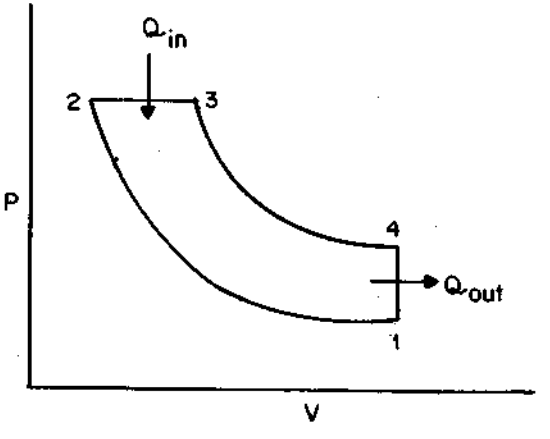
1–2 প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপ সংনমন (Reversible adiabatic compression)

2–3 ধ্রুব চাপে তাপ প্রয়োগ (Constant pressure heat addition)

3–4 প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপে প্রসারণ (Reversible adiabatic expansion)

4–1 ধ্রুব আয়তনে তাপ বর্জন (Constant volume heat rejection)

নিচে ডিজেল চক্রের দক্ষতা দেখানো হলো।



চিত্র : ১০.৫

$$\eta_D = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$$

$$= 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\frac{C_p}{C_v} (T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \left(\frac{1}{r_v}\right)^{k-1} \frac{(r_c^k - 1)}{k (r_c - 1)}$$

Note : $\frac{C_p}{C_v} = k$

$\frac{v_1}{v_2} = r_v$ সংনমনের অনুপাত (Compression ratio)

$\frac{v_3}{v_2} = r_c$ cut off ratio

$\frac{v_4}{v_3} = r_2$ প্রসারণের অনুপাত

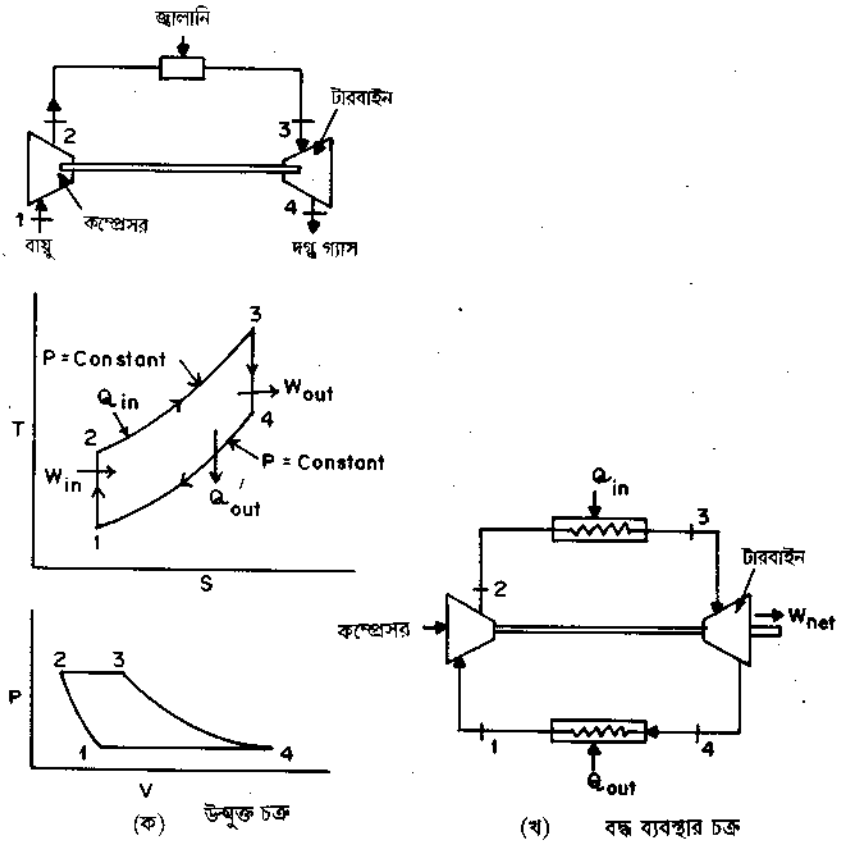
আদর্শ অটো চক্র ও আদর্শ ডিজেল চক্রের দক্ষতা তুলনা করলে লক্ষ্য করা যায়, যদি এই দুটি চক্রের সংনমনের অনুপাত (Compression ratio) একই হয় তাহলে অটো চক্রের দক্ষতা ডিজেল চক্রের দক্ষতার চেয়ে বেশি।

১০.৪ গ্যাস টারবাইন (Gas Turbine)

আদর্শ গ্যাস টারবাইনের চক্রকে ব্রেটন চক্র বলা হয়। এই চক্রকে আবার জুল চক্রও বলে। সহজ এবং আদর্শ গ্যাস টারবাইন চক্র একটি উন্মুক্ত চক্র। গ্যাস টারবাইন পরিপার্শ্ব থেকে বায়ু গ্রহণ করে একটি কম্প্রেসরে বায়ুকে সংকুচিত করে, ফলে বায়ুর চাপ ও তাপমাত্রা উভয়ই বৃদ্ধি পায়। এই বায়ু একটি কমবাস্টরে প্রবেশ করে। এখানে জ্বালানি তেল স্প্রে করা হয় এবং এই উচ্চ চাপ গ্যাস এর তাপমাত্রা বৃদ্ধি পায়। নজলের মাধ্যমে গ্যাস টারবাইনে প্রবেশ করে এবং কাজ সম্পাদন করে। উল্লেখ করা যেতে পারে যে কম্প্রেসরের মধ্যে অনেকগুলো ব্লেড থাকে এবং এই ব্লেডগুলো এমনভাবে তৈরি করা হয় যে কম্প্রেসরের মধ্যে যখন এই ব্লেডগুলো ঘোরে তখন পরিপার্শ্ব থেকে এই কম্প্রেসর বায়ু শোষণ করে নেয় ও পর্যায়ক্রমে সংকুচিত করে। অন্যদিকে টারবাইনে অনেকগুলো ব্লেড থাকে, কম্প্রেসর থেকে গ্যাস এই ব্লেডগুলোর উপর দিয়ে যাবার সময় ব্লেডগুলোতে ঘূর্ণন শক্তি সৃষ্টি করে টারবাইন কাজ উৎপন্ন করে।

টারবাইনে উৎপাদিত কাজের কিছু অংশ কম্প্রেসরকে চালানোর শক্তি যোগায়। নিচে সহজ গ্যাস টারবাইন এর চক্র বর্ণনা করা হলো। আদর্শ ব্রেটন গ্যাস টারবাইন চক্রের সাহায্যে বিষয়টি আলোচনা করা হবে।

আদর্শ ব্রেটন গ্যাস টারবাইন চক্র চারটি প্রক্রিয়ায় সম্পন্ন হয়।



চিত্র ১০.৬ : (ক) উন্মুক্ত চক্র কম্প্রেসার, (খ) বদ্ধ ব্যবস্থার চক্র।

আদর্শ ব্রেটন চক্রে তেল এর পরিবর্তে তাপ বিনিয়োগের মাধ্যমে তাপ প্রয়োগ করা হয়।

1–2 বায়ুর প্রত্যাবর্তী রুদ্ধতাপ সংকোচন (Reversible adiabatic compression)

2–3 প্রত্যাবর্তী ধ্রুব চাপে তাপ প্রয়োগ (Reversible Constant pressure heat addition)

3–4 প্রত্যাবর্তী ধ্রুব তাপ প্রসারণ (Reversible adiabatic expansion)

4–1 প্রত্যাবর্তী ধ্রুব চাপে তাপ নির্গমন (Constant pressure heat rejection)

উন্মুক্ত ব্যবস্থা এবং বদ্ধ ব্যবস্থা দুটোতেই ব্রেটন চক্র কাজ করতে পারে।

আইসেনট্রপিক প্রক্রিয়ার জন্য $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{k/k-1}$

এবং $\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{k/k-1}$

আবার $P_2 = P_3$ এবং $P_1 = P_4$

সুতরাং $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$

প্রক্রিয়া 1–2 তে,

$$W_{1-2} = h_1 - h_2 = C_p (T_1 - T_2)$$

$$= C_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = C_p T_1 \left(1 - (r_p)^{k-1/k}\right)$$

$\therefore$ $r_p = \frac{p_2}{p_1}$ = চাপের অনুপাত

$$Q_{2-3} = h_3 - h_2 = C_p (T_3 - T_2) = C_p \left\{T_3 - T_1 r_p \frac{(k-1)}{k}\right\}$$

$$W_{3-4} = C_p (T_3 - T_4) = C_p T_3 \left(1 - \frac{1}{(r_p)^{k-1/k}}\right)$$

দক্ষতা

$$\eta_0 = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3}$$

$$= 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{k-1/k}} = 1 - \frac{1}{(r_p)^{k-1/k}}$$

গ্যাস টারবাইনের একটি প্রয়োজনীয় দিক হলো বেকওয়ার্ক অনুপাত, টারবাইন থেকে যে কাজ উৎপন্ন হয় তার কিছু পরিমাণ বায়ুর কম্প্রেসর চালানোর জন্য ব্যয় করা হয়। এই অনুপাত যদি বেশি হয় তাহলে টারবাইন থেকে অন্যান্য কাজ করার জন্য অল্প শক্তি পাওয়া যাবে। সুতরাং এটি সম্পর্কে ধারণা থাকা বিশেষ প্রয়োজন। আদর্শ গ্যাস টারবাইন চক্রের বেকওয়ার্ক অনুপাত নিম্নরূপ :

বেকওয়ার্ক অনুপাত (Back work ratio)

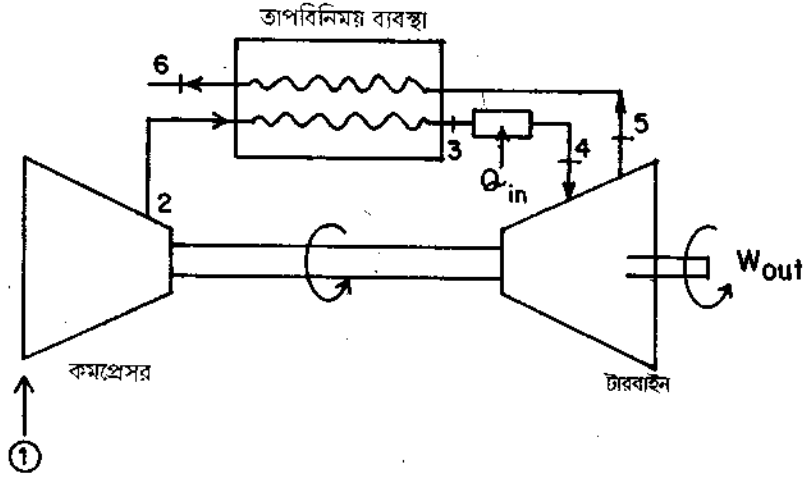
$$= \frac{W_{compressor}}{W_{Turbine}} = \frac{C_p\,(T_2 - T_1)}{C_p\,(T_3 - T4)}$$

$$= \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$

T_1, T_2, T_3 এবং T_4 ১০.৬ চিত্রে দেখানো হলো।

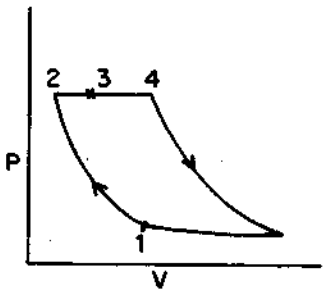
গ্যাস টারবাইনে রিজেনারেটিভ ব্যবস্থা ব্যবহার করে এর দক্ষতা বাড়ানো যায়।

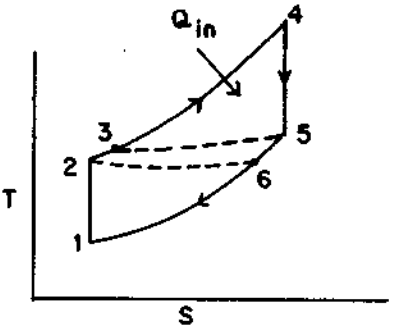
নিচে ছবিতে ব্যবস্থাটি দেখানো হলো।



কম্প্রেসর থেকে সংনমিত বাতাসে তাপ প্রয়োগ করার আগে বাতাস একটি তাপ বিনিময় ব্যবস্থার মধ্যে দিয়ে যায়, যার ফলে বাতাসের তাপমাত্রা আরো বেড়ে যায় এবং পরে তাপ প্রয়োগ করলে উচ্চ তাপমাত্রায় গমন করে। অবশ্য এর জন্য যেটি বিশেষ প্রয়োজন যে টারবাইন থেকে যে বস্তু বের হয়ে আসছে (৫নং অবস্থা) তার তাপমাত্রা অবশ্যই বাতাসের ২নং অবস্থার চেয়ে বেশি হতে হবে এবং তখনই রিজেনারেটিভ ব্যবস্থা কার্যকর হবে।

এভাবে গ্যাস টারবাইনের দক্ষতা বাড়ানো সম্ভব।





লক্ষণীয় যে, $Q_{in} = C_p (T_4 - T_3)$

আদর্শ রিজেনারেটর হলো, $T_3 = T_5$

$$W_T = C_p (T_4 - T_5)$$

$$\eta = \frac{W_{Turb} - W_{compressor}}{Q_{in}}$$

আদর্শ দক্ষতা $\eta_{regeneration} = 1 - \frac{T_1}{T_4} (r_p)^{k-1/k}$

লক্ষ্য করা যায় যে, ব্রেটন চক্রের দক্ষতা চাপের অনুপাতের উপর নির্ভর করে।

হিট ইঞ্জিন কার্য সম্পাদনের ক্ষমতা মাপার পদ্ধতি প্রথম সূত্রের বর্ণনা অনুযায়ী করা হয়ে থাকে। একে তাপীয় দক্ষতা (thermal efficiency) বলা হয়। প্রথম সূত্রের দক্ষতা অনুযায়ী দক্ষতা η এই সংকেত দ্বারা বোঝানো হয়।

চক্রের দক্ষতা $\eta_1 = \frac{W}{Q_{in}} \times 100\%$

আদর্শ চক্রের দক্ষতা $\eta_{ideal} = \frac{W}{Q_{in}} \times 100\%$

দক্ষতার অনুপাত $\varepsilon = \frac{\eta_1}{\eta_{ideal}}$

কাজের অনুপাত (Work ratio) : r_w = নিট কাজ/কাজের পরিমাণ (+ve)

উল্লেখ করা যেতে পারে যে কার্নো চক্রের কাজের অনুপাত (work ratio) কম, এটি অন্য একটি কারণ যার ফলে কার্নো চক্র বাস্তব হিট ইঞ্জিনে ব্যবহার করা হয় না।

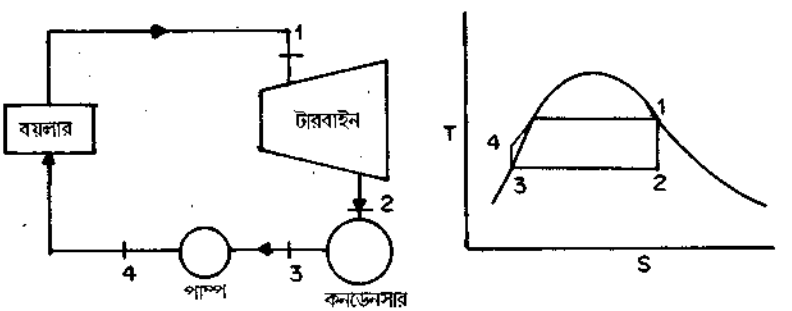
১০.৫ বাষ্পের বিভিন্ন চক্র : র‍্যাঙ্কিন চক্র, রিজেনারেটিভ চক্র, রিহিট চক্র

এই অধ্যায়ে এমন হিট ইঞ্জিন নিয়ে আলোচনা করা হবে যেখানে কার্যকর ফ্লুইডের দশা পরিবর্তন হয়, অর্থাৎ চক্রের কোনো পর্যায়ে ফ্লুইডটি তরল অবস্থায় থাকে আবার কোনো পর্যায়ে সংপক্ত বাষ্প বা অতিতাপিত বাষ্পের দশায় থাকে। পানিই এ ধরনের একটি অতি ব্যবহৃত ফ্লুইড যা স্টিম পাওয়ার প্লান্টে ব্যবহৃত হয়।

১০.৫.১ র‍্যাঙ্কিন চক্র : র‍্যাঙ্কিন চক্র ব্যবহার করে স্টিম পাওয়ার প্লান্টের সহজ চক্রটি বর্ণনা করা হলো। ১০.৭ চিত্রে বাষ্পের গতিপথ এবং P–V এবং T–S স্থানাংকে চক্রটির বর্ণনা দেয়া হলো। এই চক্র অনুযায়ী শুষ্ক বাষ্প উচ্চ চাপ ও তাপমাত্রায় টারবাইনের মধ্যে প্রবেশ করে, টারবাইনের বাষ্প আইসেনট্রপিক্যালি প্রসারিত হয় এবং কাজ সম্পাদন করে।

এরপর বাষ্প কনডেনসারে প্রবেশ করে, এই বাষ্প কনডেনসারে ঠাণ্ডা হয় এবং পানিতে রূপান্তরিত হয়। একটি পাম্পের সাহায্যে পানিকে বয়লারের চাপে তুলে আনা হয় এবং বয়লারে সমচাপে তাপ প্রয়োগ করে পূর্বের ন্যায় শুষ্ক বাষ্পে পরিণত করা হয়।

T–S ছবিতে চক্রটি দেখানো হলো।



চিত্র ১০.৭ : র‍্যাঙ্কিন চক্র।

1–2 টারবাইনে কাজ সম্পাদন

2–3 কনডেনসারে বাষ্প শীতলীকরণ

3–4 পাম্পের সাহায্যে পানিকে বয়লারের চাপে উন্নীতকরণ

4–1 বয়লারে সমচাপে তাপ প্রয়োগ

র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা নিম্নরূপে নিরূপণ করা যায়।

বাষ্পে তাপ প্রয়োগ = $h_1 - h_4$

টারবাইনে কাজ সম্পাদন = $h_1 - h_2$

কনডেনসারে তাপ বিশ্লেষণ = $h_2 - h_3$

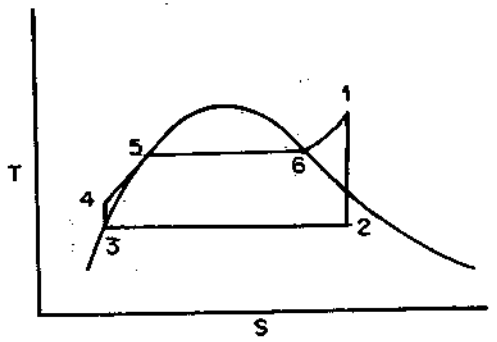
পাম্পের দ্বারা ব্যবস্থার উপর কাজ সম্পাদন = $h_4 - h_1$

র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা η_r = নিট কাজ/তাপ প্রয়োগ = $\frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_1)}{h_1 - h_4}$

যদি সম্পূর্ণ কাজের তুলনায় পাম্পের কাজ খুবই কম হয় তাহলে পাম্পের কাজ বাদ দেয়া যায়, এমন অবস্থায় র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা দাঁড়ায়

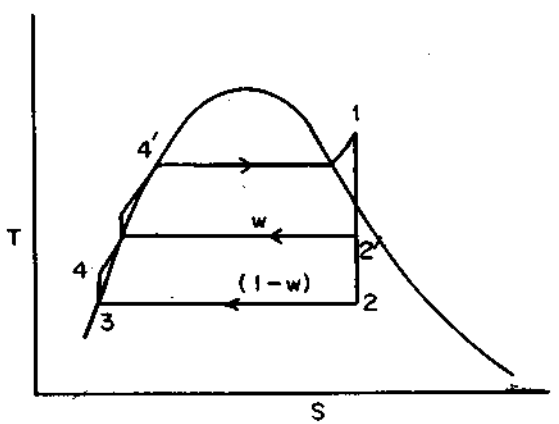
$$\eta_R = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4}$$

র‍্যাঙ্কিন সাইকেলের দক্ষতা বাড়ানোর জন্য অতিতাপিত বাষ্প ব্যবহার করা যায় এবং তার জন্য চক্রের ছবি নিম্নরূপ :



চিত্র ১০.৮ : অতিতাপিত (Superheated steam) ব্যবহার করে র‍্যাঙ্কিন চক্র।

১০.৫.২ রিজেনারেটিভ চক্র : এ ছাড়া আরো দুটি পদ্ধতি আছে যা ব্যবহার করে র‍্যাঙ্কিন চক্রের দক্ষতা ও কার্যক্ষমতা বাড়ানো যায়। একটি রিজেনারেটিভ চক্র

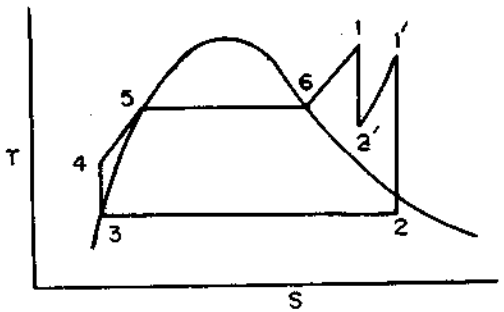


চিত্র ১০.৯ : রিজেনারেটিভ চক্র।

এই চক্রে টারবাইন থেকে কিছু বাষ্প বের করে এনে কনডেনসার থেকে বয়লারে যাওয়ার পথে ঠাণ্ডা পানিকে গরম করা হয়।

১০.৫.৩ রিহিট চক্র : এই চক্র টারবাইনে কিছু পরিমাণ কাজ করার পর বাষ্পকে পুনরায় জেনারেটরের মধ্যে প্রবেশ করিয়ে পূর্বের তাপমাত্রায় আনা হয় এবং পুনরায় আর একটি টারবাইনে প্রবেশ করিয়ে প্রসারণ করানো হয়।

রিজেনারেটিভ হিটিং এবং রিহিটিং এ যে তাপ বাষ্পে প্রয়োগ করা হয় তা বেশি তাপমাত্রায় দেয়া হয় যা চক্রের দক্ষতা বৃদ্ধি করে।

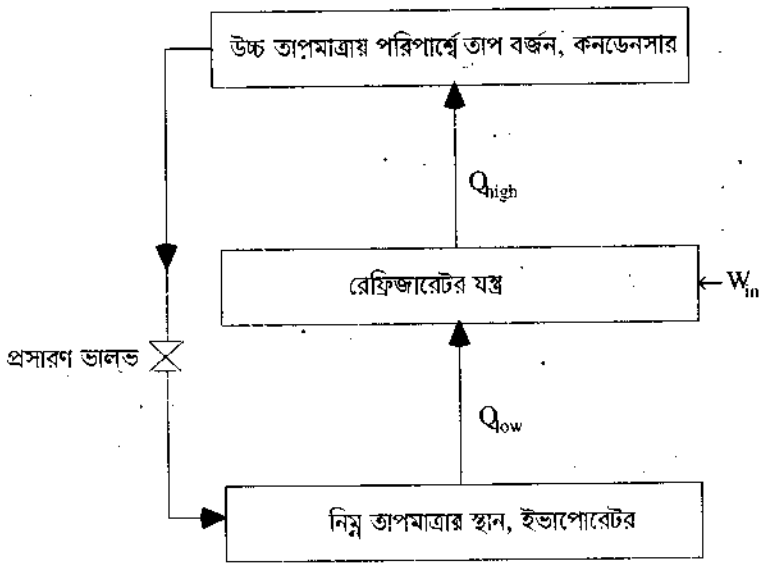


চিত্র ১০.১০ : রিহিট চক্র।

১০.৬ রেফ্রিজারেশন ব্যবস্থা

রেফ্রিজারেশন ব্যবস্থা ঠাণ্ডা জায়গা থেকে তাপ শোষণ করে এবং গরম জায়গায় তাপ নির্গত করে এবং এই ব্যবস্থার উপর কাজ সম্পাদন করা হয়। বাড়িতে রেফ্রিজারেটরের ভেতরে যেসব খাদ্য দ্রব্য রাখা হয়, এই ব্যবস্থা সেগুলো হতে তাপ শোষণ করে এবং পরিপার্শ্বের বাতাসে (বাইরের বাতাস) তাপ নির্গত করে।

যেসব বস্তু এই রেফ্রিজারেটরের ভেতরে হিমায়নের জন্য কার্যকর ফ্লুইড হিসেবে ব্যবহার করা হয় তাকে রেফ্রিজারেন্ট বলা হয়। রেফ্রিজারেটর-এর উদ্দেশ্য হচ্ছে একটি জায়গাকে ঠাণ্ডা রাখা। এর বিপরীতটি হলো হিট পাম্প, যা মূলত একই তবে হিট পাম্পের উদ্দেশ্য হচ্ছে একটি জায়গা বা পরিবেশকে গরম রাখা।



চিত্র ১০.১১ : রেফ্রিজারেটরের সহজ কার্যপ্রণালি।

রেফ্রিজারেটরের দক্ষতাকে COP (Coefficient of performance) বলা হয়।

$$COP = \frac{Q}{W_{in}} = \text{তাপ শোষণ/কাজ}$$

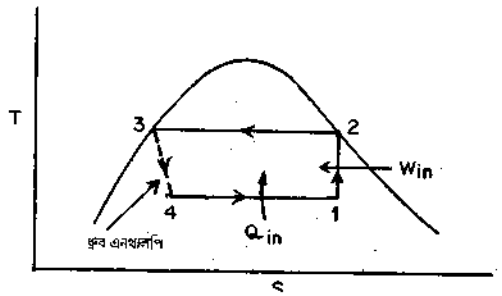
Q = নিট তাপ শোষণ

W_{in} = রেফ্রিজারেটরে যে পরিমাণ কাজ করা হয়।

রেফ্রিজারেশন দুই ধরনের ব্যবস্থা বহুল প্রচলিত। একটি ব্যবস্থায় রেফ্রিজারেন্ট বাষ্পকে কম্প্রেসরের সাহায্যে নিষ্কাশন ও সংকুচিত করা হয়। এটিকে ভেপর কম্প্রেশন রেফ্রিজারেশন ব্যবস্থা বলা হয়। অপরটিতে রেফ্রিজারেন্ট বাষ্পকে অন্য একটি শোষণক্ষম তরল পদার্থের মাধ্যমে শুষে নেয়। এই বিশেষ তরল পদার্থটি কম তাপমাত্রায় রেফ্রিজারেন্ট শুষে নেয় ও বেশি তাপমাত্রায় এই শোষিত রেফ্রিজারেন্টকে বের করে দেয়। একে ভেপর অ্যাবসোরপশন রেফ্রিজারেশন (Vapour absorption refrigeration system) ব্যবস্থা বলা হয়।

ভেপর কম্প্রেশন চক্র

T–S ডায়াগ্রামে এই চক্রটি দেখানো হলো।



চিত্র ১০.১২ : ভেপার কম্প্রেশন চক্র।

এই চক্রে

1–2 = অসংপৃক্ত রেফ্রিজারেন্ট কম্প্রেসরে প্রবেশ করে এবং চাপ প্রয়োগ করে এর অবস্থা '2' এ উন্নীত করা হয়।

2–3 = কনডেনসারের মাধ্যমে তাপ বর্জন করা হয় এবং রেফ্রিজারেন্ট সম্পূর্ণ তরল দশায় পরিণত হয়।

3–4 = ধ্রুব এনথালপিতে এই তরল রেফ্রিজারেন্টকে নিম্নচাপে প্রসারণ ঘটানো হয়। এর চাপ ও তাপ উভয়েই কমে যায়।

4–1 = রেফ্রিজারেন্ট পরিপার্শ্ব থেকে তাপ শোষণ করে ও ক্রমশ বাষ্পে পরিণত হয়। এই জায়গাকে ইভাপোরেটর বলা হয়।

বিশেষভাবে উল্লেখ্য যে, রেফ্রিজারেশন ব্যবস্থার ঠাণ্ডা করার ক্ষমতাকে অনেক সময় টন অব রেফ্রিজারেশন বলা হয়। 24 ঘণ্টায় 1 ton বরফ গলে পানি করতে যে হারে তাপ প্রবাহ প্রয়োজন হয় তাকে 1 ton অব রেফ্রিজারেশন বলা হয়।

1 ton অব রেফ্রিজারেশন = 3.52 kw (12000 Btu/hr)

ভেপর কম্প্রেশন রেফ্রিজারেশন ব্যবস্থায় বহুল ব্যবহৃত তিনটি রেফ্রিজারেন্ট গ্রুপের নাম দেয়া হলো।

১। CFC (chlorofluorocarbon) যেমন R–11, R–12, এগুলো ওজোন (Ozone) স্তরের ক্ষতি সাধন করে।

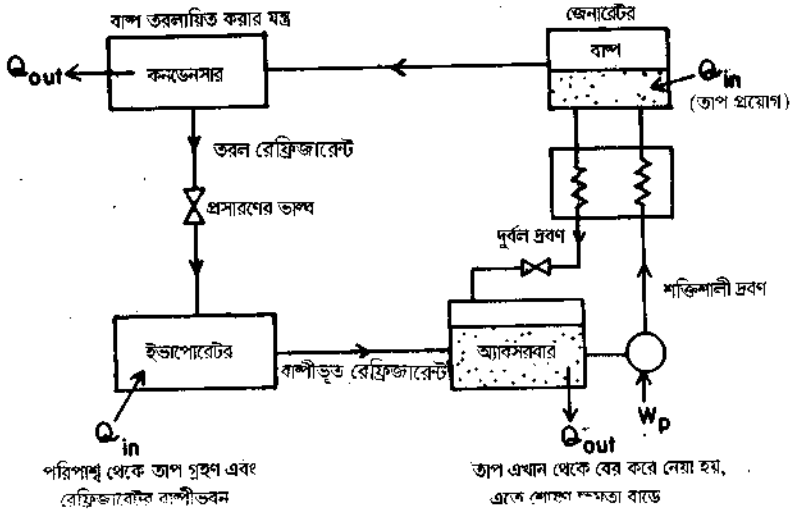
২। HCFC (hydrochlorofluorocarbon) যেমন R–22, R–23, এগুলো ওজোন স্তরের কম ক্ষতি সাধন করে।

৩। HFC (hydrofluorocarbon) যেমন R–134a, R416, এগুলো ওজোন স্তরের ক্ষতি করে না।

এগুলো ছাড়াও আরো অনেক ধরনের রেফ্রিজারেন্ট রয়েছে।

অ্যাবসোরপশন রেফ্রিজারেশন ব্যবস্থা

নিচের ছবিতে এই ব্যবস্থা সহজ করে দেখানো হলো।



এই ব্যবস্থার কার্যপ্রণালী সহজ করে বোঝানো হলো। ইভাপোরেটর থেকে বাষ্পীভূত রেফ্রিজারেন্ট অ্যাবসরবারে গমন করে এবং সেখানে দুর্বল দ্রবণে শোষিত হয় এবং দ্রবণে রেফ্রিজারেন্টের পরিমাণ বেড়ে যায়। এই তরল দ্রবণ একটি পাম্পের সাহায্যে তাপ বিনিময় ব্যবস্থার মধ্যে দিয়ে জেনারেটরে পাঠানো হয় এবং একই সাথে এর চাপও বৃদ্ধি পায়। জেনারেটরে পরিমাণ মতো তাপ প্রয়োগ করা হয় এবং রেফ্রিজারেন্ট বাষ্প হয়ে দ্রবণ থেকে বের হয়ে আসে ও কনডেনসারে গমন করে, এখানে বাষ্পকে তরলায়িত করা হয়। এই উচ্চ চাপ তরল রেফ্রিজারেন্ট একটি প্রসারণ ভাল্ভের সাহায্যে নিম্নচাপে ইভাপোরেটরে গমন করে ও পুনরায় চক্রটি আরম্ভ হয়।

জেনারেটর থেকে দুর্বল দ্রবণ তাপ বিনিময় ব্যবস্থার মধ্যে দিয়ে অ্যাবসরবারে প্রবেশ করে ও এই চক্রটিও পুনরায় আরম্ভ হয়। জেনারেটরে বিভিন্নভাবে তাপ প্রয়োগ করা যায়, যেমন গ্যাস, তেল, সৌরশক্তি ইত্যাদি।

অ্যামোনিয়া-পানি এরকম একটি ব্যবস্থা, যেখানে অ্যামোনিয়া রেফ্রিজারেন্ট ও পানি অ্যাবসরবারের কাজ করে। অ্যামোনিয়া-পানি ব্যবস্থার তাপমাত্রা $0^{\circ}C$ এর নিচে নেয়া সম্ভব। পানি-লিথিয়াম ব্রোমাইড বা পানি-লিথিয়াম ক্লোরাইড এ রকম আর একটি ব্যবস্থা যেখানে পানি রেফ্রিজারেন্ট হিসেবে কাজ করে। এই ব্যবস্থায় যেহেতু পানি রেফ্রিজারেন্ট হিসেবে কাজ করে, তাই এই ব্যবস্থাকে $0^{\circ}C$ এর নিচে নেয়া সম্ভব নয়, এই ব্যবস্থা সাধারণত এয়ারকন্ডিশনে ব্যবহৃত হয়। অ্যাবসোরপশন ব্যবস্থা যেহেতু পাম্প তরল অবস্থায় কার্যকর

দ্রবণে চাপ প্রয়োগ করে, তাই কাজের পরিমাণ কম, অন্যদিকে এ ব্যবস্থা থেকে বেশি পরিমাণ তাপ বের করে দিতে হয়।

$$COP_{(\text{অ্যাবসোরপ্শন ব্যবস্থা})} = \frac{Q_{\text{ইভাপোরেটর}}}{Q_{\text{জেনারেটর}} + W_{\text{পাম্প}}}$$

$$= \frac{\text{ইভাপোরেটর যে পরিমাণ তাপ শোষণ করেছে}}{\text{জেনারেটরে যে পরিমাণ তাপ প্রয়োগ করা হয়েছে + পাম্প দ্বারা সম্পাদিত কাজ}}$$

গাণিতিক সমস্যাবলি

১। একটি আদর্শ অটো চক্রের $r_v = 10$, সবচেয়ে কম তাপমাত্রা 200°C এবং চাপ 200KPa. এই চক্রটি 1000 kJ/kg কাজ করে। নিচের বিষয়গুলো বের কর। বাতাস চক্রটির কার্যকর ফ্লুইড।

(ক) η_{otto}, (খ) সর্বোচ্চ তাপমাত্রা

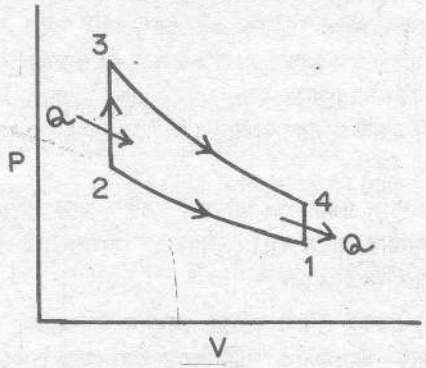
(গ) সব প্রক্রিয়ার শেষের তাপমাত্রা

(ঘ) $\eta_{carnot\ (equivalent)}$ (ঙ) গড় চাপ

(ক) $\eta_{otto} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$ [বাতাস ধরা হয়েছে, $k = 1.4$]

$= 1 - \frac{1}{(10)^{1.4-1}}$

$= 0.602$ অর্থাৎ 80.2%



(খ) নিট সম্পাদিত কাজ

$W_{\text{নিট}} = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1}$

1–2 এবং 3–4 আইসেনট্রপিক ধরা হয়েছে।

$= W_{1-2} + W_{3-4} = Q_{in} - Q_{out}$

$T_1 = 200 + 273K$

$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$ $= C_v (T_3 - T_2) - C_v (T_4 - T_1)$

$= 473 (10)^{1.4-1}$ $= C_v (T_3 - T_2 - T_4 + T_1)$

$= 1188K.$ $1000 = 0.717 (473 - 1188 + T_3 - T_4)$

$T_3 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{k-1}$

$= 2.5\, T_4$

$\therefore \quad 1000 = 0.719 (473 - 1188 + 2.52\, T_4 - T_4)$

$\therefore \quad T_4 = 1396.\ OK$

$T_3 = 3505$

(ঘ) $\eta_{carnot} = 1 - \frac{473}{3505} = 86.5\%$

(ঙ) $v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287)\,(473)}{(200)} = 0.6788 \frac{m^3}{kg}$; $v_2 = \frac{v_1}{10}$;

$\therefore \quad MEP = \frac{W_{net}}{v_1 - v_2} = 1637.0\ kPa$

(২) একটি ডিজেল ইঞ্জিনের কার্যকর ফ্লুইড বাতাস এবং এর সংনমনের অনুপাত '18' এবং কাট অফ এর অনুপাত 2.05

ইঞ্জিনটির দক্ষতা বের কর।

উত্তর : $\eta_{diesel} = 1 - \frac{1}{r_1^{(k-1)}} \frac{(r_c^{\,k} - 1)}{k\,(r_c - 1)}$

$= 1 - \frac{1}{(18)^{.4}} \left\{\frac{(2.05)^{1.4} - 1}{1.4\,(2.05 - 1)}\right\}$

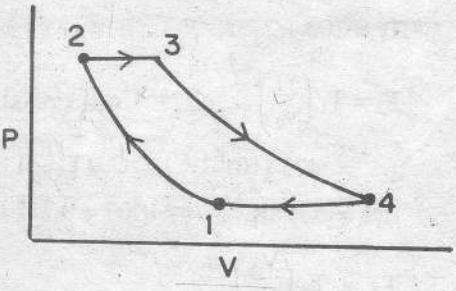
$= .629$

অথবা 62.9%

৩। একটি আদর্শ গ্যাসটারবাইনে বায়ু 100 kPa চাপে এবং 25°C তাপে প্রবেশ করে। চাপের অনুপাত 5, সর্বোচ্চ তাপমাত্রা 850°C, নিচের বিষয়গুলো বের কর।

(ক) বেকওয়ার্ক অনুপাত, (খ) টারবাইনের দক্ষতা।

সমাধান :



বেকওয়ার্ক অনুপাত $= \dfrac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}$$

$$= (298)\,(5)^{0.2857}$$

$$= 472.0$$

$$\left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{k/k-1} = \frac{P_3}{P_4}, \quad T_3 = 1123 \text{ K}$$

$$T_4 = 709.1 \text{ K}$$

$\therefore$ (ক) বেকওয়ার্ক অনুপাত $= \dfrac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 42\%$

দক্ষতা $\eta = 1 - (r_p)^{(1-k)/k}$

$$= 1 - 0.631$$

$$= .369$$

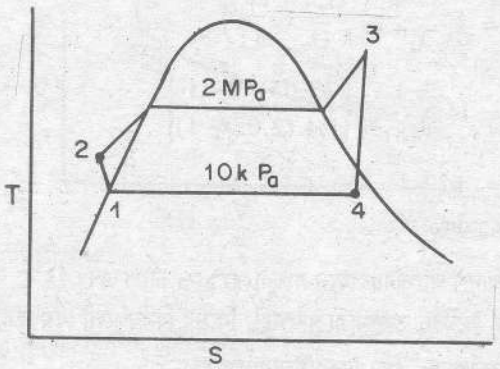
অথবা 36.9%

৪। একটি পানির বাষ্প চালিত আদর্শ পাওয়ার প্লান্ট 10kPa এবং 2MPa ও তাপমাত্রা 400°C এর মধ্যে কাজ করে। নিচের বিষয়গুলো নির্ণয় কর।

(ক) পাম্প দ্বারা সম্পাদিত কাজ W_p

(খ) টারবাইন দ্বারা সম্পাদিত কাজ W_T

(গ) চক্রের দক্ষতা।



বাষ্পের সারণি থেকে

$h_1 = h_f = 191.8$ kJ/kg

$h_3 = 3248$ kJ/kg

$S_3 = S_4 = 7.1279$ kJ/kg.K

$W_p = v_1 (p_2 - p_1) = (0.001)(2000 - 10) = 1.99$ kJ/kg

$h_2 = h_f + w_p = 191.8 + 1.99 = 193.79 \frac{kJ}{kg}$

$S_4 = S_f + x_4 S_{fg}$

$7.1279 = 0.6491 + x_4\ 7.5019$

$x_4 = 0.8636$

$h_4 = 2259$ kJ/kg ; $(h_4 = 192 + (0.8636)(2393)$

$\therefore W_T = h_3 - h_4 = 2348 - 2259 = 989$ kJ/kg

$$\eta = \frac{W_T - W_p}{h_3 - h_4} = \frac{989 - 1.99}{3054} = 0.3232$$

অথবা 32.32%

৫। একটি ভেপর কম্প্রেশন রেফ্রিজারেশন চক্রে ফেরন 12 ব্যবহার করা হয়েছে। রেফ্রিজারেন্ট প্রবাহের পরিমাণ 0.6 kg/s, ইভাপোরেটরের তাপমাত্রা –20°C. বাষ্প শুষ্ক অবস্থায় কম্প্রেসরে প্রবেশ করে এবং আইসেনট্রপিক্যালি সংনমন করা হয়। কনডেনসারের তাপমাত্রা 41.46°C. নিম্নের বিষয়গুলো বের কর :

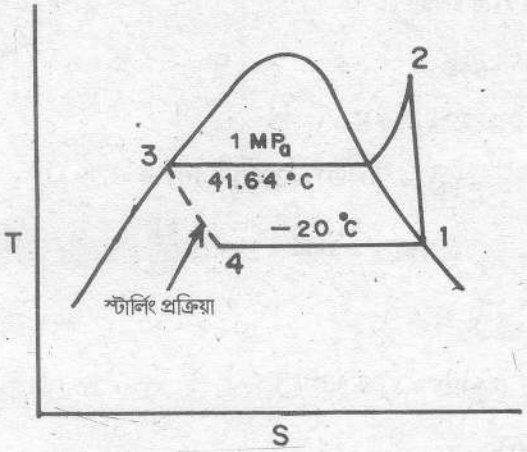
(ক) কম্প্রেসরে কাজের পরিমাণ (W_c)

(খ) দক্ষতা (COP)

(গ) টন অব রেফ্রিজারেশন

(ঘ) প্রতি টনে কম্প্রেসরের অশ্বশক্তি।

সমাধান :



চক্রে ও Freon – 12 এর গুণাবলির সারণি থেকে লক্ষ্য করা যায় যে

41.64°C তাপমাত্রায় চাপের পরিমাণ 1 MPa

$h_1 = 178.6$ kJ/kg

$h_3 = h_4 = 76.3$ kJ/kg

$S_1 = S_2 = 0.7082$ kJ/kg. K

অতিতাপিত freon – 12 এর টেবিল থেকে ইন্টারপোলেশন এর মাধ্যমে h_2 এর মান নির্ণয় করা হলো। $h_2 = 212.2 \frac{kJ}{kg.K}$

রেফ্রিজারেশনের হার

$$Q_{REF} = m (h_1 - h_4) = 0.6 (178.6 - 76.3) = 61.4 \text{ kW}$$

কম্প্রেসরের কাজ

$$W_c = m (h_2 - h_1) = 0.6 (212.2 - 178.6) = 20.2 \text{ kW}$$

$$COP = \frac{61.4}{20.2} = 3.04$$

$$\text{Ton} = \frac{61.4}{3.52} = 17.44 \text{ Ton}$$

$$\text{HP/Ton} = \frac{(20.2) / (0.746)}{17.44} = 1.55$$

প্রশ্নমালা

১। একটি বায়ু ব্যবহৃত আদর্শ অটো চক্রের r_v এর মান 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20 এর জন্য দক্ষতা নির্ণয় কর, একটি গ্রাফে আঁক ও আলোচনা কর।

২। একটি বায়ু ব্যবহৃত আদর্শ ডিজেল ইঞ্জিন চক্রে কাট অফ অনুপাত $r_c = 1.5$ ধরে, সংনমনের অনুপাত v_v এর মান 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20 এর জন্য দক্ষতা নির্ণয় কর ও গ্রাফে আঁক এবং আলোচনা কর।

৩। একটি বায়ু ব্যবহৃত আদর্শ গ্যাসটারবাইন চক্রের জন্য r_p এর মান 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 এর জন্য দক্ষতা নির্ণয় কর ও গ্রাফে আঁক এবং আলোচনা কর।

৪। একটি আদর্শ কার্নো ইঞ্জিনের কাজের অনুপাত (work ratio) নির্ণয় কর।

উত্তর : $r_w = \dfrac{T_2 - T_1}{T_2 + \dfrac{T_2 - T_1}{(k-1)\ln v_2/v_1}}$

৫। একটি আদর্শ অটো চক্রের কাজের অনুপাত নির্ণয় কর। **উত্তর :** $r_w = 1 - \dfrac{T_1}{T_4}$

সংকেত : $r_w = \dfrac{\text{net positive work}}{\text{gross positive work}}$

৬। একটি আদর্শ অটো চক্রের $r_v = 8$, সংনমনের আগে এর চাপ 0.1 MPa, তাপমাত্রা 15°C, এই চক্রে 1800 kJ/kg তাপ দেয়া হয়। চক্রটি বায়ুচালিত। নিচের বিষয়গুলো নির্ণয় কর।

(ক) প্রতিটি প্রক্রিয়ার শেষ চাপ ও তাপমাত্রা

(খ) চক্রের দক্ষতা

যদি কিছু দেয়া না থাকে তা অনুমান কর।

উত্তর : (ক) $T_2 = 662K$, $P_2 = 1.838$ MPa

$T_3 = 3174$ K, $P_3 = 8.813$ MPa

$T_4 = 1380$ K $P_4 = 0.4795$ MPa

(খ) $\eta_{otto} = 56.5\%$

৭। ৬নং অংক দ্রষ্টব্য শুধু $r_v = 18$, বায়ুচালিত আদর্শ ডিজেল চক্রের জন্য বের কর। যদি কিছু দেয়া না থাকে তা অনুমান কর।

(ক) প্রতিটি প্রক্রিয়ার শেষে তাপ ও চাপ

(খ) দক্ষতা

উত্তর : (ক) $T_2 = 915.8,\ P_2 = 5.72$ MPa

$V_3 = 0.13598\ m^3/kg\ \ T_4 = 1316$ K

(খ) $\eta_{diel} = 59.1\%$

৮। একটি আদর্শ গ্যাসটারবাইন চক্রে বায়ু ব্যবহৃত হচ্ছে, বাতাস 0.1 MPa চাপে এবং 15°C তাপে কম্প্রেসারে প্রবেশ করে এবং 1.0 MPa তে কম্প্রেসর থেকে বের হয়। চক্রে সর্বোচ্চ তাপমাত্রা 1100°C। নিচের বিষয়গুলো বের কর।

(ক) প্রতিটি প্রক্রিয়ার শেষের তাপ ও চাপের পরিমাণ, কম্প্রেসারে কাজের পরিমাণ, টারবাইনে কাজের পরিমাণ।

(খ) দক্ষতা।

উত্তর : দক্ষতা $\eta_{Brayton} = 48.2$

W_c কম্প্রেসরে কাজের পরিমাণ -269.5 kJ/kg

$W_T = 664.7,\ W_{net} = 395.2$

৯। প্রশ্ন ৮এ একটি আদর্শ রিজেনারেটর বসানো হলো। রিজেনারেটর অবস্থায় চক্রটির দক্ষতা কত?

পরিশিষ্ট

সারণি-১ : Properties of SATURATED WATER – Temperature Table, SI Units

T °C	P kPa	v_f m^3/kg	v_{fg} m^3/kg	v_g m^3/kg	u_f kJ/kg	u_{fg} kJ/kg	u_g kJ/kg	h_f kJ/kg	h_{fg} kJ/kg	h_g kJ/kg	S_f kJ/(kg.K)	S_{fg} kJ/(kg.K)	S_g kJ/(kg.K)
5	0.8726	0.001000	147.02	147.02	21.020	2360.4	2381.4	21.021	2488.7	2509.7	0.07626	8.9473	9.0236
10	1.2281	0.001000	106.32	106.32	41.986	2346.3	2388.3	41.988	2476.9	2518.9	0.1510	8.7476	8.8986
15	1.7056	0.001001	77.896	77.897	62.915	2332.3	2395.2	62.917	2465.1	2528.0	0.2242	8.5550	8.7792
20	2.3388	0.001002	57.777	57.778	83.833	2318.2	2402.0	83.835	2453.4	2537.2	0.2962	8.3689	8.6651
25	3.1690	0.001003	43.356	43.357	104.75	2304.1	2408.9	104.75	2441.6	2546.3	0.3670	8.1888	8.5558
30	4.2455	0.001004	32.895	32.896	125.67	2290.0	2415.7	125.67	2429.6	2555.3	0.4365	8.0148	8.4513
35	5.6267	0.001006	25.219	25.220	146.58	2275.9	2422.5	146.59	2417.8	2564.4	0.5050	7.8461	8.3511
40	7.3814	0.001008	19.527	19.528	167.50	2261.7	2429.2	167.50	2405.9	2573.4	0.5723	7.6827	8.2550
45	9.5898	0.001010	15.262	15.263	188.41	2247.5	2435.9	188.42	2393.9	2582.3	0.6385	7.5244	8.1629
50	12.344	0.001012	12.036	12.037	209.31	2233.3	2442.6	209.33	2381.9	2591.2	0.7037	7.3708	8.0745
55	15.752	0.001015	9.5716	9.5726	230.22	2219.0	2449.2	230.24	2369.8	2600.0	0.7679	7.2217	7.9896
60	19.932	0.001017	7.6733	7.6743	251.13	2204.7	2455.8	251.15	2357.7	2608.8	0.8312	7.0768	7.9080
65	25.022	0.001020	6.1986	6.1996	272.05	2190.3	2462.4	272.08	2345.4	2617.5	0.8935	6.9360	7.8295
70	31.176	0.001023	5.0437	5.0447	292.98	2175.8	2468.8	293.01	2333.1	2626.1	0.9549	6.7991	7.7540
75	38.563	0.001026	4.1323	4.1333	313.92	2161.3	2475.2	313.96	2320.6	2634.6	1.0155	6.6658	7.6112
80	47.373	0.001029	3.4078	3.4088	334.88	2146.7	2481.6	334.93	2308.2	2643.1	1.0753	6.5359	7.6112
85	57.815	0.001032	2.8279	2.8289	355.86	2132.0	2487.9	355.92	2295.5	2651.4	1.1343	6.4093	7.5436
90	70.117	0.001036	2.3607	2.3617	376.86	2117.1	2494.0	376.93	2282.7	2659.6	1.1925	6.2859	7.4784
95	84.529	0.001040	1.9818	1.9828	397.89	2102.2	2500.1	397.98	2269.7	2667.7	1.2501	6.1633	7.4154
100	101.32	0.001043	1.6726	1.6736	418.96	2087.1	2506.1	419.06	2256.6	2675.7	1.3069	6.0476	7.3545

105	120.79	0.001047	1.4190	1.4200	440.05	2072.1	2512.1	440.18	2243.4	2683.6	1.3630	5.9326	7.2956
110	143.24	0.001052	1.2095	1.2106	461.19	2056.7	2517.9	466.34	2230.0	2691.3	1.4186	5.8200	7.2386
115	169.02	0.001056	1.0359	1.0370	482.36	2041.1	2523.5	482.54	2216.3	2698.8	1.4735	5.7098	7.1833
120	198.48	0.001060	0.8911	0.8922	503.57	2025.5	2529.1	503.78	2202.4	2706.2	1.5278	5.6019	7.1297
125	232.01	0.001065	0.7698	0.7709	524.82	2009.7	2534.5	525.07	2188.3	2713.4	1.5815	5.4962	7.0777
130	270.02	0.001070	0.6676	0.6687	546.12	1993.7	2539.8	546.41	2174.0	2720.4	1.6346	5.3926	7.0272
135	312.93	0.001075	0.5813	0.5824	567.46	1977.5	2545.0	567.80	2159.4	2727.2	1.6873	5.2907	6.9780
140	361.19	0.001080	0.5079	0.5090	588.85	1961.2	2550.0	589.24	2144.6	2733.8	1.7394	5.1908	6.9302
145	415.29	0.001085	0.4453	0.4464	610.30	1944.5	2554.8	610.75	2129.4	2740.2	1.7910	5.0926	6.8836
150	475.72	0.001090	0.3918	0.3929	631.80	1927.7	2559.5	632.32	2114.1	2764.4	1.8421	4.9960	6.8381
155	542.99	0.001096	0.3457	0.3468	653.35	1910.7	2564.0	653.95	2098.4	2752.3	1.8927	4.9010	6.7937
160	617.66	0.001102	0.3060	0.3071	674.97	1893.3	2568.3	675.65	2082.3	2758.0	1.9429	4.8074	6.7503
165	700.29	0.001108	0.2716	0.2727	696.65	1875.7	2572.4	697.43	2065.9	2763.3	1.9927	4.7151	6.7078
170	791.47	0.001114	0.2417	0.2428	718.40	1857.9	2576.3	719.28	2049.2	2768.5	2.0421	4.6241	6.6662
175	891.80	0.001121	0.2157	0.2168	740.22	1839.7	2579.9	741.22	2032.1	2773.3	2.0910	4.5344	6.6254
180	1001.9	0.001127	0.1929	0.1940	762.12	1821.3	2583.4	763.25	2014.6	2777.8	2.1397	4.4456	6.5853
185	1122.5	0.001134	0.1730	0.1741	784.10	1802.5	2586.6	785.37	1996.6	2782.0	2.1879	4.3580	6.5459
190	1254.2	0.001141	0.1554	0.1565	806.17	1783.4	2589.6	807.60	1978.2	2785.8	2.2358	4.2713	6.5071
195	1397.6	0.001149	0.1399	0.1410	828.33	1764.0	2592.3	829.93	1959.5	2789.4	2.2834	4.1855	6.4689
200	1553.6	0.001156	0.1261	0.1273	850.58	1744.1	2594.7	852.38	1940.1	2792.5	2.3308	4.1004	6.4312
205	1722.9	0.001164	0.1140	0.1152	872.95	1723.9	2596.9	874.95	1920.4	2795.3	2.3778	4.0162	6.3940
210	1906.2	0.001173	0.1032	0.1044	895.43	1703.3	2598.7	897.66	1900.0	2797.7	2.4246	3.9326	6.3572
215	2104.2	0.001181	0.09357	0.09475	918.02	1682.3	2600.3	920.51	1879.2	2799.7	2.4712	3.8496	6.3208

220	2317.8	0.001190	0.08497	0.08616	940.75	1660.9	2601.6	943.51	1857.8	2801.3	2.5175	3.7672	6.2847
225	2547.9	0.001199	0.07726	0.07840	963.61	1638.9	2602.5	966.67	1835.7	2802.4	2.5637	3.6851	6.2488
230	2795.1	0.001209	0.07034	0.07155	986.62	1616.5	2603.1	990.00	1813.1	2803.1	2.6097	3.6034	6.2131
235	3060.4	0.001219	0.06412	0.06534	1009.8	1593.5	2603.3	1013.5	1789.8	2803.3	2.6556	3.5221	6.1777
240	3344.7	0.001229	0.05851	0.05974	1033.1	1570.0	2603.1	1037.2	1765.8	2803.0	2.7013	3.4410	6.1423
245	3648.8	0.001240	0.05345	0.05469	1056.6	1546.0	2602.6	1061.2	1740.9	2802.1	2.7470	3.3600	6.1070
250	3973.6	0.001251	0.04886	0.05011	1080.3	1521.3	2601.6	1085.3	1715.4	2800.7	2.7926	3.2791	6.0717
255	4820.2	0.001263	0.04470	0.04596	1104.3	1495.9	2600.2	1109.7	1689.1	2798.8	2.8382	3.4981	6.0363
260	4689.4	0.001276	0.04091	0.04219	1128.4	1470.0	2598.4	1134.4	1661.8	2796.2	2.8838	3.1191	6.0000
265	5082.3	0.001289	0.03747	0.03876	1152.8	1443.2	2596.0	1159.3	1633.7	2793.0	2.9294	3.0358	5.9022
270	5499.9	0.001303	0.03434	0.03564	1177.4	1415.8	2593.2	1184.6	1604.5	2789.1	2.9751	2.9542	5.9293
275	5943.1	0.001317	0.03146	0.03278	1202.3	1387.4	2589.7	1210.1	1574.4	2784.5	3.0209	2.8722	5.8931
280	6413.2	0.001332	0.02883	0.03016	1227.5	1358.2	2585.7	1236.1	1543.1	2779.2	3.0669	2.7896	5.8565
285	6911.1	0.001349	0.02642	0.02777	1253.1	1328.0	2581.1	1262.4	1510.6	2773.0	3.1131	2.7064	5.8195
290	7438.0	0.001366	0.02419	0.02556	1279.0	1296.7	2575.7	1289.1	1476.8	2765.9	3.1595	2.6223	5.7818
295	7995.2	0.001384	0.02216	0.02354	1305.3	1264.4	2569.7	1316.3	1441.5	2757.8	3.2062	2.5372	5.7434
300	8583.8	0.001404	0.02027	0.02167	1332.0	1230.8	2562.8	1344.1	1404.6	2748.7	3.2534	2.4508	5.7042
305	9205.1	0.001425	0.01852	0.01994	1359.2	1195.8	2555.0	1372.3	1366.2	2738.5	3.3010	2.3630	5.6640
310	9860.5	0.001447	0.01689	0.01834	1387.0	1159.2	2546.2	1401.2	1325.8	2727.0	3.3491	2.2735	5.6226
315	10.550	0.001472	0.01539	0.01686	1415.3	1121.0	2536.3	1430.8	1283.4	2714.2	3.3979	2.1820	5.5799
320	11.280	0.001498	0.01398	0.01548	1444.4	1080.8	2525.2	1461.3	1238.4	2699.7	3.4476	2.0880	5.5356
325	12.050	0.001528	0.01266	0.01419	1474.2	1038.4	2512.6	1492.6	1190.9	2683.5	3.4983	1.9910	5.4893
330	12.850	0.001560	0.01142	0.01298	1504.9	993.50	2498.4	1525.0	1140.3	2665.3	3.5501	1.8906	5.4407

335	13.700	0.001596	0.01025	0.01185	1536.8	945.50	2482.3	1558.6	1086.1	2644.7	3.6035	1.7859	5.3894
340	14.590	0.001637	0.009153	0.01079	1569.9	894.00	2463.9	1593.8	1027.5	2621.3	3.6587	1.6758	5.3345
345	15.530	0.001684	0.008094	0.009778	1604.7	838.00	2442.7	1630.9	963.60	2594.5	3.7164	1.5589	5.2753
350	16.520	0.001740	0.007072	0.008812	1641.7	776.20	2417.9	1670.4	893.10	2563.5	3.7774	1.4331	5.2105
355	12.560	0.001808	0.006071	0.007879	1681.5	706.90	2388.4	1713.3	813.40	2526.7	3.8429	1.2950	5.3379
360	18.660	0.001894	0.005068	0.006962	1725.6	626.60	2352.2	1761.0	721.00	2482.0	3.9153	1.1389	5.0542
365	19.810	0.002012	0.004017	0.006029	1776.8	528.40	2305.2	1816.7	607.90	2424.6	3.9994	0.9526	4.9520
370	21.030	0.002207	0.002786	0.004993	1843.3	391.90	2235.2	1889.7	450.50	2340.2	4.1094	0.7004	4.8098
375	22.055	0.00311	--	0.00311	2017	--	2017	2086	--	2086	4.409	--	4.409

সারণি-২ : Properties of SATURATED WATER – Pressure Table, SI Units

P kPa	T °C	v_f m^3/kg	v_{fg} m^3/kg	v_g m^3/kg	u_f kJ/kg	u_{fg} kJ/kg	u_g kJ/kg	h_f kJ/kg	h_{fg} kJ/kg	h_g kJ/kg	S_f kJ/(kg.K)	S_{fg} kJ/(kg.K)	S_g kJ/(kg.K)
1.0	6.9696	0.001000	129.19	129.19	29.287	2354.8	2384.1	29.288	2484.0	2513.3	0.1059	8.8678	8.9737
1.5	13.021	0.001001	87.970	87.971	54.634	2337.9	2392.5	54.635	2469.8	2524.4	0.1954	8.6304	8.8258
2.0	17.497	0.001001	66.997	66.998	73.364	2325.2	2398.6	73.366	2459.2	2432.6	0.2603	8.4613	8.7216
2.5	21.080	0.001002	54.248	54.249	88.353	2315.1	2403.5	88.356	2450.7	2539.1	0.3116	8.3295	8.6411
3.0	24.083	0.001003	45.660	45.661	1.0092	2306.7	2407.6	1.0092	2443.7	2544.6	0.3541	8.2214	8.5755
3.5	26.677	0.001003	39.473	39.474	111.77	2299.4	2411.2	111.77	2437.5	2549.3	0.3904	8.1299	8.5203
4.0	28.966	0.001004	34.797	34.798	121.34	2293.0	2414.3	121.35	2432.2	2553.5	0.4222	8.0503	8.4725
4.5	31.018	0.001005	31.136	31.137	129.93	2287.2	2417.1	129.93	2427.3	2557.2	0.4506	7.9799	8.4305
5.0	32.881	0.001005	28.190	28.191	137.72	2281.9	2419.6	137.72	2422.8	2560.5	0.4761	7.9169	8.3930
5.5	34.589	0.001006	25.767	25.768	144.86	2277.0	2421.9	144.87	2418.7	2563.6	0.4994	7.8598	8.3592
6.0	36.167	0.001006	23.737	23.738	151.46	2272.5	2424.0	151.47	2415.0	2566.5	0.5208	7.8075	8.3283
6.5	37.635	0.001007	22.013	22.014	157.60	2268.4	2426.0	157.61	2411.5	2569.1	0.5406	7.7594	8.3000
7.0	39.008	0.001008	20.528	20.529	163.35	2264.5	2427.9	163.35	2408.3	2571.6	0.5590	7.7148	8.2738
7.5	40.299	0.001008	19.236	19.237	168.75	2260.9	2429.6	168.76	2405.1	2573.9	0.5763	7.6731	8.2494
8.0	41.518	0.001008	18.102	18.103	173.85	2257.5	2431.3	173.85	2402.3	2576.1	0.5925	7.6342	8.2267
8.5	42.673	0.001009	17.098	17.099	178.68	2254.1	2432.8	178.68	2399.4	2578.1	0.6078	7.5975	8.2053
9.0	43.771	0.001009	16.202	16.203	183.27	2251.0	2434.3	183.27	2396.8	2580.1	0.6223	7.5629	8.1852
9.5	44.817	0.001010	15.398	15.399	187.64	2248.1	2435.7	187.65	2394.4	2582.0	0.6361	7.5301	8.1662
10	45.817	0.001010	14.673	14.674	191.82	2245.2	2437.0	191.83	2392.0	2583.8	0.6493	7.4989	8.1482
15	53.983	0.001014	10.022	10.023	225.97	2221.9	2447.9	225.98	2372.2	2598.2	0.7550	7.2516	8.0066
20	60.073	0.001017	7.6489	7.6499	251.44	2204.5	2455.9	251.46	2357.4	2608.9	0.8321	7.0747	7.9068
25	64.980	0.001020	6.2038	6.2048	271.97	2190.3	2462.3	271.99	2345.4	2617.4	0.8933	6.9365	7.8298

30	69.114	0.001022	5.2288	5.2298	289.27	2178.4	2467.7	289.30	2335.3	2624.6	0.9441	6.8231	7.7672
35	72.700	0.001024	4.5252	4.5262	304.28	2168.0	2472.3	304.32	2326.4	2630.7	0.9878	6.7266	7.7144
40	75.877	0.001026	3.9930	3.9940	317.59	2158.8	2476.4	317.64	2318.5	2636.1	1.0261	6.6427	7.6688
45	78.736	0.001028	3.5759	3.5769	329.58	2150.4	2480.0	329.62	2311.3	2640.9	1.0603	6.5684	7.6287
50	81.339	0.001030	3.2398	3.2408	340.49	2142.8	2483.3	340.54	2304.8	2645.3	1.0912	6.5016	7.5928
60	85.949	0.001033	2.7314	2.7324	359.84	2129.2	2489.0	359.90	2293.1	2653.0	1.1454	6.3856	7.5310
70	89.956	0.001036	2.3644	2.3654	376.68	2117.3	2494.0	376.75	2282.9	2659.6	1.1920	6.2869	7.4789
80	93.511	0.001038	2.0866	2.0876	391.63	2106.7	2498.3	391.71	2273.6	2665.3	1.2330	6.2009	7.4339
90	96.713	0.001041	1.8688	1.8698	405.11	2097.1	2502.2	405.20	2265.3	2670.5	1.2696	6.1247	7.3943
100	99.632	0.001043	1.6933	1.6943	417.41	2088.3	2505.7	417.51	2257.6	2675.1	1.3027	6.0562	7.3589
101.32	100.00	0.001043	1.6727	1.6737	418.96	2087.1	2506.1	419.06	2256.6	2675.7	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.99	0.001048	1.3742	1.3752	444.25	2068.9	2513.2	444.38	2240.7	2685.1	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.38	0.001053	1.1584	1.1595	467.02	2052.4	2519.4	467.18	2226.2	2693.4	1.4338	5.7894	7.2232
175	116.07	0.001057	1.0027	1.0038	486.89	2037.8	2524.7	487.08	2213.3	2700.4	1.4851	5.6866	7.1717
200	120.24	0.001060	0.8848	0.8859	504.59	2024.8	2529.4	504.80	2201.7	2706.5	1.5304	5.5968	7.1272
225	124.01	0.001064	0.7923	0.7934	520.59	2012.9	2533.5	520.83	2191.2	2712.0	1.5708	5.5172	7.0880
250	127.44	0.001067	0.7177	0.7188	535.22	2001.9	2537.1	535.49	2181.3	2716.8	1.6075	5.4454	7.0529
275	130.61	0.001070	0.6563	0.6574	548.73	1991.8	2540.5	549.02	2172.3	2721.3	1.6411	5.3800	7.0211
300	133.56	0.001073	0.6048	0.6059	561.29	1982.2	2543.5	561.61	2163.7	2725.3	1.6721	5.3200	6.9921
325	136.31	0.001076	0.5609	0.5620	573.04	1973.3	2546.3	573.39	2155.6	2729.0	1.7009	5.2645	6.9654
350	138.89	0.001079	0.5232	0.5243	584.10	1964.8	2548.9	584.48	2147.9	2732.4	1.7278	5.2129	6.9407
375	141.33	0.001081	0.4903	0.4914	594.56	1956.7	2551.3	594.96	2140.6	2735.6	1.7531	5.1646	6.9177
400	143.64	0.001084	0.4614	0.4625	604.47	1949.0	2553.5	604.91	2133.6	2738.5	1.7770	5.1191	6.8961
425	145.84	0.001086	0.4357	0.4368	613.91	1941.7	2555.6	614.37	2126.9	2741.3	1.7996	5.0762	6.8758
450	147.94	0.001088	0.4129	0.4140	622.93	1934.7	2557.6	623.42	2120.5	2743.9	1.8211	5.0356	6.8567

475	149.94	0.001090	0.3923	0.3934	631.56	1927.8	2559.4	632.07	2114.2	2764.3	1.8415	4.9971	6.8386
500	151.87	0.001093	0.3738	0.3749	639.84	1921.4	2561.2	640.38	2108.2	2784.6	1.8610	4.9604	6.8214
550	155.49	0.001097	0.3415	0.3426	655.48	1908.9	2564 4	656.08	2096.8	2752.9	1.8977	4.8917	6.7894
600	158.86	0.001101	0.3145	0.3156	670.05	1897.3	2567.3	670.71	2086.0	2756.7	1.9315	4.8286	6.7601
650	162.02	0.001104	0.2915	0.2926	683.71	1886.2	2569.9	684.42	2075.8	2760.2	1.9631	4.7699	6.7330
700	164.98	0.001108	0.2717	0.2728	696.58	1875.8	2572.4	697.35	2066.0	2763.3	1.9925	4.7154	6.7079
750	167.79	0.001111	0.2544	0.2555	708.76	1865.8	2574.6	709.59	2056.6	2766.2	2.0203	4.6642	6.6845
800	170.44	0.001115	0.2393	0.2404	720.33	1856.3	2576.6	721.33	2047.7	2768.9	2.0464	4.6161	6.6625
850	172.97	0.001118	0.2258	0.2269	731.37	1874.1	2578.5	732.32	2039.1	2771.4	2.0712	4.5706	6.6418
900	175.39	0.001121	0.2138	0.2149	741.92	1838.3	2580.2	742.93	2030.7	2773.6	2.0948	4.5274	6.6222
950	177.70	0.001124	0.2030	0.2041	752.03	1829.8	2581.8	753.10	2022.6	2775.7	2.1173	4.4863	6.6036
1000	179.92	0.001127	0.1933	0.1944	761.75	1821.6	2583.3	762.88	2014.8	2777.7	2.1388	4.4471	6.5859
1100	184.10	0.001133	0.1764	0.1775	780.14	1805.9	2586.0	781.38	1999.8	2781.2	2.1793	4.3736	6.5529
1200	188.00	0.001138	0.2622	0.1633	797.31	1791.1	2588.4	798.68	1985.6	2784.3	2.2167	4.3059	6.5226
1300	191.64	0.001144	0.1501	0.1512	813.44	1777.1	2590.5	814.93	1972.1	2787.0	2.2515	4.2430	6.4945
1400	195.08	0.001149	0.1397	0.1408	828.67	1763.6	2592.3	830.28	1959.1	2789.4	2.2842	4.1841	6.4683
1500	198.33	0.001154	0.1305	0.1317	843.12	1750.8	2593.9	844.85	1946.7	2791.5	2.3150	4.1288	6.4438
1600	201.41	0.001159	0.1225	0.1237	856.88	1738.4	2595.3	858.73	1934.6	2793.3	2.3441	4.0766	6.4207
1700	204.35	0.001163	0.1155	0.1167	870.02	1726.6	2596.6	872.00	1923.0	2795.0	2.3717	4.0272	6.3989
1800	207.15	0.001168	0.1092	0.1104	882.61	1715.1	2597.7	884.71	1911.7	2796.4	2.3980	3.9801	6.3781
1900	209.84	0.001172	0.1035	0.1047	894.70	1704.0	2598.7	896.92	1900.7	2797.6	2.4231	3.9353	6.3584
2000	212.42	0.001177	0.09841	0.09959	906.33	1693.2	2599.5	908.69	1890.0	2798.7	2.4471	3.8925	6.3396
2250	218.45	0.001187	0.08753	0.08872	933.70	1667.5	2601.2	936.37	1864.4	2800.8	2.5032	3.7926	6.2958
2500	223.99	0.001197	0.07875	0.07995	958.98	1643.3	2602.3	961.97	1840.2	2802.2	2.5544	3.7016	6.2560
2750	229.11	0.001207	0.07151	0.07272	982.53	1620.5	2603.0	985.85	1817.2	2803.0	2.6016	3.6178	6.2194

3000	233.89	0.001217	0.06544	0.06666	1004.6	1598.7	2603.3	1008.3	1795.0	2803.3	2.6454	3.5401	6.1855
3250	238.37	0.001226	0.06027	0.06150	1025.5	1577.7	2603.2	1029.5	1773.6	2803.1	2.6865	3.4673	6.1538
3500	242.60	0.001235	0.05582	0.05705	1045.3	1557.6	2602.9	1049.6	1753.0	2802.6	2.7251	3.3989	6.1240
3750	246.59	0.001244	0.05194	0.05318	1064.2	1538.1	2602.3	1068.8	1732.9	2801.7	2.7616	3.3341	6.0957
4000	250.39	0.001252	0.04852	0.04977	1082.2	1519.3	2601.5	1087.2	1713.4	2800.6	2.7962	3.2727	6.0689
5000	263.98	0.001286	0.03815	0.03944	1147.8	1448.7	2596.5	1154.2	1639.5	2793.7	2.9201	3.0524	5.9725
6000	275.62	0.001319	0.03112	0.03244	1205.4	1383.9	2589.3	1213.3	1570.6	2783.9	3.0266	2.8620	5.8886
7000	285.86	0.001352	0.02602	0.02737	1257.5	1322.7	2580.2	1267.0	1504.8	2771.8	3.1211	2.6919	5.8130
8000	295.04	0.001384	0.02214	0.02352	1305.5	1264.1	2569.6	1316.6	1441.2	2757.8	3.2066	2.5365	5.7431
9000	303.38	0.001418	0.01906	0.02048	1350.3	1207.3	2557.6	1363.1	1378.9	2742.0	3.2855	2.3916	5.6771
10,000	311.03	0.001452	0.01658	0.01803	1392.8	1151.4	2544.2	1407.3	1317.2	2724.5	3.3591	2.2548	5.6139
11,000	318.11	0.001488	0.01450	0.01599	1433.3	1096.2	2529.5	1449.7	1255.7	2705.4	3.4287	2.1238	5.5525
12,000	324.71	0.001526	0.01273	0.01426	1472.4	1041.0	2513.4	1490.7	1193.8	2684.5	3.4953	1.9968	5.4921
13,000	330.89	0.001566	0.01121	0.01278	1510.5	985.20	2495.7	1530.9	1130.9	2661.8	3.5595	1.8723	5.4318
14,000	336.70	0.001610	0.009870	0.01148	1547.9	928.40	2476.3	1570.4	1066.7	2637.1	3.6220	1.7491	5.3711
15,000	342.19	0.001657	0.008683	0.01034	1585.0	870.00	2455.0	1609.8	1000.3	2610.1	3.6837	1.6255	5.3092
16,000	347.39	0.001710	0.007600	0.009310	1622.1	809.20	2431.3	1649.5	930.80	2580.3	3.7452	1.4999	5.2451
17,000	352.34	0.001770	0.006603	0.008373	1659.9	744.90	2404.8	1690.0	857.10	2547.1	3.8073	1.3704	5.1777
18,000	357.04	0.001840	0.005665	0.007505	1698.9	675.70	2374.6	1732.0	777.70	2509.7	3.8714	1.2340	5.1054
19,000	361.52	0.001925	0.004756	0.006681	1740.3	599.00	2339.3	1776.8	689.40	2466.2	3.9393	1.0862	5.0255
20,000	365.80	0.002036	0.003838	0.005874	1786.0	510.10	2296.1	1826.7	586.90	2413.6	4.1046	0.9184	4.9330
21,000	369.88	0.002200	0.002820	0.005020	1841.4	396.00	2237.4	1887.6	455.20	2342.8	4.1062	0.7079	4.8141
22,000	373.77	0.002702	0.000952	0.003654	1953.4	142.80	2096.2	2012.8	163.60	2176.5	4.2866	0.2530	4.5486
22,055	373.98	0.00311	--	.00311	2017	--	2017	2086	--	2086	4.409	--	4.409

সারণি-৩ : Properties of SUPERHEATED STEAM – SI Units

P,kPa	T, °C	v,m^3/kg	u,kJ/kg	h,kJ/kg	s,kJ/(kg.K)
10	(45.82)	(14.674)	(2437.0)	(2583.8)	(8.1482)
	50	14.869	2443.1	2591.8	8.1731
	100	17.196	2515.0	2687.0	8.4471
	150	19.513	2587.4	2782.5	8.6873
	200	21.826	2660.8	2879.0	8.9030
	250	24.136	2735.5	2976.9	9.0995
	300	26.446	2811.7	3076.2	9.2808
	350	28.755	2889.5	3177.0	9.4494
	400	31.063	2968.8	3279.4	9.6075
	450	33.372	3049.7	3383.4	9.7565
	500	35.680	3132.4	3489.2	9.8979
	550	37.988	3216.7	3596.6	10.032
	600	40.296	3302.8	3705.7	10.161
	650	42.604	3390.6	3816.7	10.285
	700	44.912	3480.2	3929.4	10.404
	750	47.220	3571.6	4043.8	10.518
	800	49.527	3664.8	4160.1	10.629
	850	51.835	3759.7	4278.1	10.737
50	(81.33)	(3.2408)	(2483.3)	(2645.3)	(7.5928)
	100	3.4188	2511.2	2682.1	7.6941
	150	3.8895	2585.2	2779.7	7.9394
	200	4.3560	2659.4	2877.2	8.1572
	250	4.8205	2734.5	2975.6	8.3548
	300	5.2840	2811.0	3075.2	8.5367
	350	5.7469	2888.9	3176.2	8.7057
	400	6.2094	2968.3	3278.8	8.8640
	450	6.6717	3049.3	3382.9	9.0132
	500	7.1338	3132.0	3488.7	9.1547
	550	7.5958	3216.4	3596.2	9.2894
	600	8.0577	3302.5	3705.4	9.4182
	650	8.5195	3390.4	3816.4	9.5417
	700	8.9813	3480.1	3929.1	9.6606
	750	9.4430	3571.5	4043.6	9.7754
	800	9.9047	3664.7	4159.9	9.8863
	850	10.366	3759.6	4277.9	9.9938

100	(99.63)	(1.6943)	(2505.7)	(2675.1)	(7.3589)
	100	1.6961	2506.3	2675.9	7.3609
	150	1.9364	2582.4	2776.1	7.6129
	200	2.1723	2657.6	2874.8	7.8335
	250	2.4061	2733.3	2973.9	8.0325
	300	2.6388	2810.1	3073.9	8.2152
	350	2.8709	2888.2	3175.3	8.3846
	400	3.1027	2967.7	3278.0	8.5432
	450	3.3342	3048.9	3382.3	8.6927
	500	3.5655	3131.6	3488.2	8.8342
	550	3.7968	3216.1	3595.8	8.9690
	600	4.0279	3302.3	3705.0	9.0979
	650	4.2590	3390.2	3816.1	9.2216
	700	4.4900	3479.8	3928.8	9.3405
	750	4.7210	3571.3	4043.4	9.4553
	800	4.9519	3664.5	4159.7	9.5662
	850	5.1828	3759.4	4277.7	9.6738
101.33	(100.00)	(1.6737)	(2506.1)	(2675.7)	(7.3545)
	150	1.9108	2582.3	2776.0	7.6066
	200	2.1436	2657.5	2874.8	7.8273
	250	2.3744	2733.3	2973.8	8.0264
	300	2.6041	2810.0	3073.9	8.2090
	350	2.8332	2888.1	3175.2	8.3785
	400	3.0619	2967.7	3278.0	8.5371
	450	3.2904	3048.9	3382.3	8.6865
	500	3.5187	3131.6	3488.2	8.8281
	550	3.7469	3216.1	3595.8	8.9629
	600	3.9750	3302.2	3705.0	9.0918
	650	4.2030	3390.2	3816.1	9.2154
	700	4.4310	3479.8	3928.8	9.3344
	750	4.6590	3571.3	4043.4	9.4492
	800	4.8869	3664.5	4159.7	9.5601
	850	5.1148	3759.4	4277.7	9.6677
200	(120.24)	(0.8859)	(2529.4)	(2706.5)	(7.1272)
	150	0.9597	2576.7	2768.6	7.2793
	200	1.0803	2653.9	2870.0	7.5059
	250	1.1988	2730.8	2970.5	7.7078
	300	1.3162	2808.2	3071.4	7.8920
	350	1.4329	2886.7	3173.3	8.0624

	400	1.5493	2966.6	3276.4	8.2216
	450	1.6655	3047.9	3381.0	8.3714
	500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133
	550	1.8973	3215.4	3594.9	8.6483
	600	2.0130	3301.7	3704.3	8.7773
	650	2.1287	3389.7	3815.4	8.9011
	700	2.2443	3479.4	3928.3	9.0201
	750	2.3599	3570.9	4042.9	9.1350
	800	2.4755	3664.1	4159.2	9.2460
	850	2.5910	3759.1	4277.3	9.3536
300	(133.56)	(0.6059)	(2543.5)	(2725.3)	(6.9921)
	150	0.6339	2570.7	2760.9	7.0779
	200	0.7163	2650.2	2865.1	7.3108
	250	0.7963	2728.2	2967.1	7.5157
	300	0.8753	2806.3	3068.9	7.7015
	350	0.9536	2885.3	3171.3	7.8729
	400	1.0315	2965.4	3274.9	8.0327
	450	1.1092	3047.0	3379.7	8.1830
	500	1.1867	3130.1	3486.1	8.3252
	550	1.2641	3214.7	3594.0	8.4604
	600	1.3414	3301.1	3703.5	8.5895
	650	1.4186	3389.1	3814.7	8.7134
	700	1.4958	3478.9	3927.7	8.8325
	750	1.5729	3570.5	4042.3	8.9475
	800	1.6500	3663.8	4158.8	9.0585
	850	1.7271	37 58.8	4276.9	9.1661
400	(143.64)	(0.4625)	(2553.5)	(2738.5)	(6.8961)
	150	0.4708	2564.4	2752.8	6.9300
	200	0.5342	2646.4	2860.1	7.1699
	250	0.5951	2725.6	2963.6	7.3779
	300	0.6548	2804.4	3066.3	7.5654
	350	0.7139	2883.8	3169.4	7.7378
	400	0.7726	2964.3	3273.3	7.8982
	450	0.8311	3046.0	3378.5	8.0489
	500	0.8894	3129.3	3485.0	8.1914
	550	0.9475	3214.1	3593.1	8.3268
	600	1.0056	3300.5	3702.7	8.4561
	650	1.0636	3388.6	3814.1	8.5801
	700	1.1215	3478.5	3927.1	8.6993

	750	1.1794	3570.1	4041.8	8.8143
	800	1.2373	3663.4	4158.3	8.9254
	850	1.2951	3758.4	4276.5	9.0331
600	(158.86)	(0.3156)	(2567.3)	(2756.7)	(6.7601)
	200	0.3520	2638.5	2849.7	6.9658
	250	0.3938	2720.3	2956.6	7.1806
	300	0.4344	2800.5	3061.2	7.3713
	350	0.4742	2880.9	3165.4	7.5459
	400	0.5137	2961.9	3270.2	7.7076
	450	0.5529	3044.1	3375.9	7.8591
	500	0.5920	3127.7	3482.9	8.0022
	550	0.6309	3212.7	3591.2	8..380
	600	0.6697	3299.3	3701.2	8.2676
	650	0.7085	3387.6	3812.7	8.3918
	700	0.7472	3477.6	3925.9	8.5112
	750	0.7859	3569.2	4040.8	8.6264
	800	0.8246	3662.7	4157.4	8.7376
	850	0.8632	3757.8	4275.7	8.8453
800	(170.44)	(0.2404)	(2576.6)	(2768.9)	(6.6625)
	200	0.2607	2630.2	2838.8	6.8151
	250	0.2931	2714.8	2949.3	7.0373
	300	0.3241	2796.6	3055.9	7.2319
	350	0.3544	2877.9	3161.4	7.4084
	400	0.3843	2959.6	3267.0	7.5713
	450	0.4139	3042.2	3373.3	7.7237
	500	0.4433	3126.1	3480.7	7.8673
	550	0.4726	3211.3	3589.4	8.0036
	600	0.5018	3298.1	3699.6	8.1335
	650	0.5310	3386.6	3811.4	8.2579
	700	0.5601	3476.7	3924.7	8.3775
	750	0.5892	3568.4	4039.8	8.4928
	800	0.6182	3661.9	4156.5	8.6041
	850	0.6472	3757.1	4274.9	8.7120
1000	(179.92)	(0.1944)	(2583.3)	(2781.2)	(6.5529)
	200	0.2059	2621.5	2827.4	6.6932
	250	0.2326	2709.2	2941.9	6.9235
	300	0.2579	2792.7	3050.6	7.1219
	350	0.2825	2874.9	3157.3	7.3005

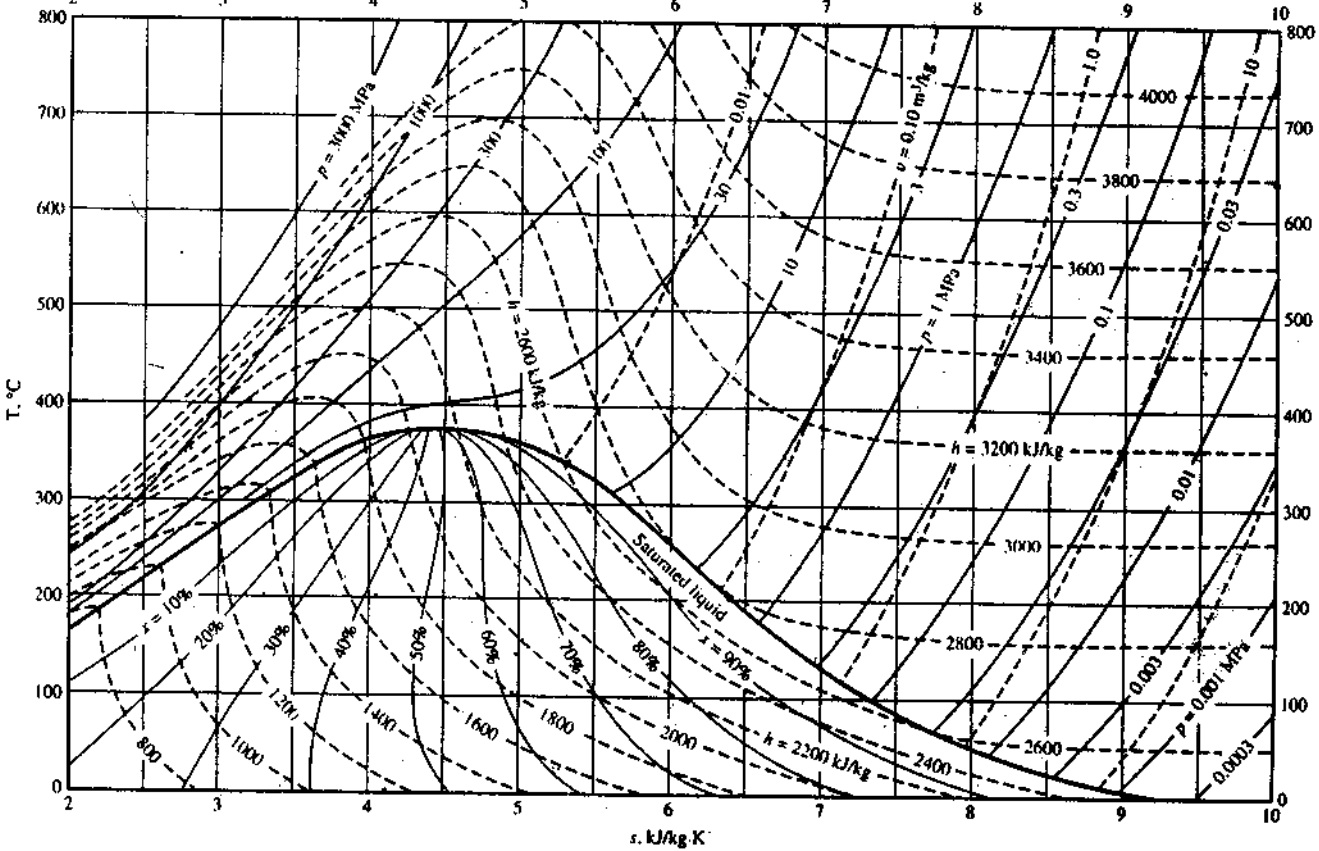
	400	0.3066	2957.2	3263.8	7.4648
	450	0.3304	3040.3	3370.7	7.6180
	500	0.3541	3124.5	3478.6	7.7622
	550	0.3776	3210.0	3587.6	7.8989
	600	0.4011	3297.0	3698.1	8.0292
	650	0.4245	3385.5	3810.0	8.1538
	700	0.4478	3475.7	3923.6	8.2736
	750	0.4711	3567.6	4038.7	8.3890
	800	0.4944	3661.2	4155.5	8.5005
	850	0.5176	3756.4	4274.0	8.6084
1500	(198.33)	(0.1317)	(2593.9)	(2791.5)	(6.4438)
	200	0.1324	2597.5	2796.1	6.4536
	250	0.1519	2694.6	2922.4	6.7077
	300	0.1696	2782.5	3036.9	6.9168
	350	0.1866	2867.2	3147.1	7.1011
	400	0.2030	2951.2	3255.7	7.2687
	450	0.2192	3035.4	3364.2	7.4242
	500	0.2351	3120.4	3473.1	7.5699
	550	0.2510	3206.5	3583.0	7.7076
	600	0.2668	3294.0	3694.2	7.8386
	650	0.2825	3382.9	3806.6	7.9639
	700	0.2981	3473.4	3920.6	8.0841
	750	0.3137	3565.6	4036.1	8.1999
	800	0.3293	3659.3	4153.2	8.3116
	850	0.3448	3754.8	4272.0	8.4198
2000	(212.42)	(0.099.59)	(2599.5)	(2798.7)	(6.3396)
	250	0.1114	2678.8	2901.6	6.5438
	300	0.1254	2771.8	3022.7	6.7651
	350	0.1386	2859.4	3136.6	6.9556
	400	0.1512	2945.1	3247.5	7.1269
	450	0.1635	3030.5	3357.5	7.2845
	500	0.1757	3116.3	3467.7	7.4318
	550	0.1877	3203.1	3578.4	7.5706
	600	0.1996	3291.0	3690.2	7.7024
	650	0.2114	3380.3	3803.2	7.8283
	700	0.2232	3471.1	3917.6	7.9490
	750	0.2350	3563.5	4033.5	8.0651
	800	0.2467	3657.5	4150.9	8.1771
	850	0.2584	3753.1	4269.9	8.2855

2500	(223.99)	(0.07995)	(2602.3)	(2802.2)	(6.2560)
	250	0.08698	2661.7	2879.1	6.4069
	300	0.09888	2760.8	3008.0	6.6424
	350	0.1097	2851.4	3125.8	6.8395
	400	0.1201	2938.9	3239.2	7.0146
	450	0.1301	3025.5	3350.9	7.1746
	500	0.1400	3112.2	3462.2	7.3235
	550	0.1497	3199.6	3573.8	7.4634
	600	0.1593	3288.0	3686.3	7.5960
	650	0.1688	3377.7	3799.8	7.7225
	700	0.1783	3468.8	3914.7	7.8436
	750	0.1878	3561.4	4030.9	7.9601
	800	0.1972	3655.6	4148.6	8.0724
	850	0.2066	3751.4	4267.9	8.1810
3000	(233.89)	(0.06666)	(2603.3)	(2803.3)	(6.1855)
	250	0.07056	2643.1	2854.8	6.2857
	300	0.08113	2749.2	2992.6	6.5375
	350	0.09052	2843.2	3114.8	6.7420
	400	0.09935	2932.7	3230.7	6.9210
	450	0.1079	3020.5	3344.1	7.0835
	500	0.1162	3108.1	3456.6	7.2339
	550	0.1244	3196.1	3569.1	7.3750
	600	0.1324	3285.0	3682.3	7.5084
	650	0.1404	3375.1	3796.4	7.6355
	700	0.1484	3466.5	3911.7	7.7571
	750	0.1563	3559.4	4028.3	7.8739
	800	0.1642	3653.8	4146.3	7.9865
	850	0.1720	3749.7	4265.8	8.0954
4000	(250.39)	(0.04977)	(2601.5)	(2800.6)	(6.0689)
	300	0.05882	2724.4	2959.7	6.3598
	350	0.06644	2826.1	3091.8	6.5811
	400	0.07340	2919.8	3213.4	6.7688
	450	0.08002	3010.3	3330.4	6.9364
	500	0.08642	3099.7	3445.4	7.0902
	550	0.09268	3189.0	3559.7	7.2335
	600	0.09884	3278.9	3674.3	7.3687
	650	0.1049	3369.8	3789.5	7.4970
	700	0.1110	3461.8	3905.7	7.6195
	750	0.1170	3555.2	4023.0	7.7371
	800	0.1229	3650.0	4141.7	7.8503
	850	0.1288	3746.3	4261.7	7.9596

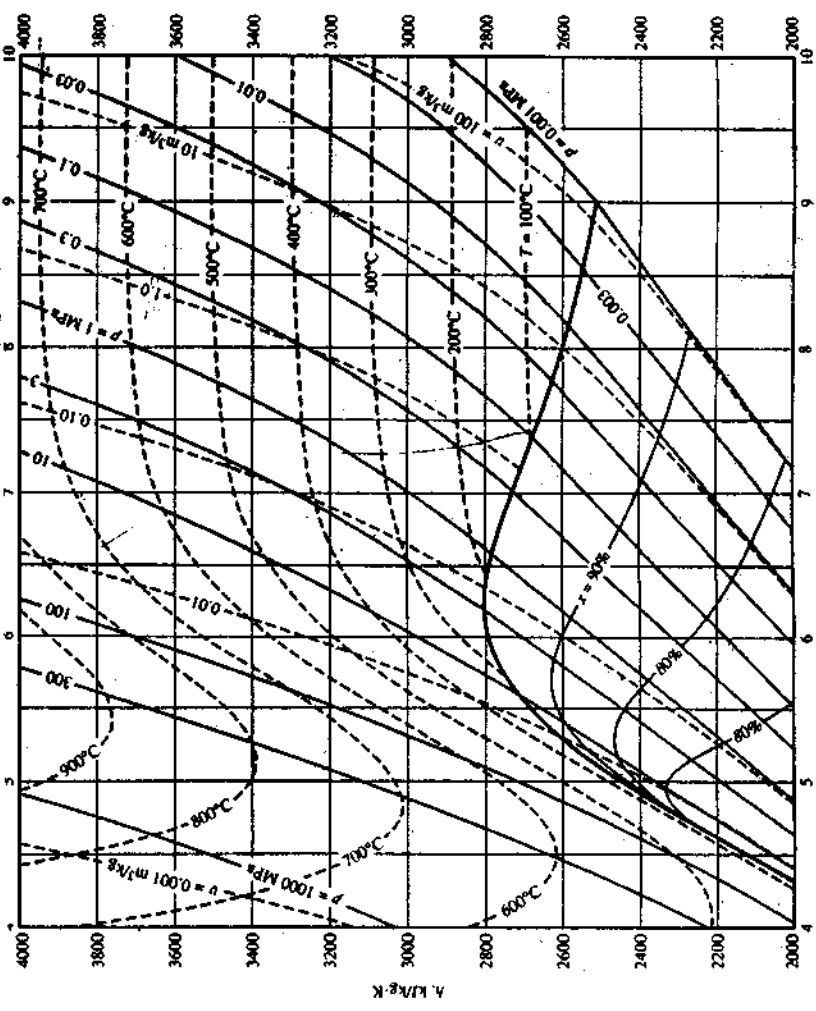
5000	(293.98)	(0.03944)	(2596.5)	(2793.7)	(5.9725)
	300	0.04530	2697.0	2923.5	6.2067
	350	0.05193	2808.0	3067.7	6.4482
	400	0.05781	2906.5	3195.5	6.6456
	450	0.06330	2999.8	3316.3	6.8187
	500	0.06856	3091.1	3433.9	6.9760
	550	0.07367	3181.8	3550.2	7.1218
	600	0.07869	3272.8	3666.2	7.2586
	650	0.08362	3364.5	3782.6	7.3882
	700	0.08850	3457.1	3899.7	7.5117
	750	0.09334	3551.0	4017.7	7.6300
	800	0.09815	3646.3	4137.0	7.7438
	850	0.1029	3742.9	4257.5	7.8536
6000	(275.62)	(0.03244)	(2596.5)	(2793.7)	(5.9725)
	300	0.03615	2666.3	2883.2	6.0659
	350	0.04222	2788.9	3042.2	6.3322
	400	0.04739	2892.7	3177.0	6.5404
	450	0.05214	2989.1	3301.9	6.7195
	500	0.05665	3082.4	3422.3	6.8805
	550	0.06100	3174.6	3540.6	7.0287
	600	0.06525	3266.6	3658.1	7.1673
	650	0.06942	3359.1	3775.6	7.2982
	700	0.07353	3452.4	3893.6	7.4227
	750	0.07760	3546.8	4012.4	7.5418
	800	0.08164	3642.5	4132.3	7.6561
	850	0.08565	3739.5	4253.4	7.7664
7000	(285.86)	(0.02737)	(2580.2)	(2771.8)	(5.8130)
	300	0.02946	2631.4	2837.6	5.9293
	350	0.03523	2768.5	3015.1	6.2269
	400	0.03993	2878.4	3157.9	6.4474
	450	0.04416	2978.1	3287.3	6.6329
	500	0.04813	3073.6	3410.5	6.7978
	550	0.05194	3167.2	3530.8	6.9486
	600	0.05565	3260.3	3649.8	7.0889
	650	0.05927	3353.6	3764.5	7.2211
	700	0.06284	3447.6	3887.5	7.3466
	750	0.06636	3542.6	4007.1	7.4665
	800	0.06985	3638.7	4127.6	7.5815
	850	0.07331	3736.1	4249.2	7.6922
8000	(295.04)	(0.02352)	(2569.6)	(2757.8)	(5.7431)
	300	0.02426	2590.5	2784.6	5.7901
	350	0.02995	2746.7	2986.3	6.1286

	400	0.03431	2863.5	3138.0	6.3630
	450	0.03816	2966.9	3272.2	6.5554
	500	0.04174	3064.6	3398.5	6.7243
	550	0.04515	3159.8	3521.0	6.8778
	600	0.04845	3254.0	3641.5	7.0200
	650	0.05166	3348.1	3761.4	7.1535
	700	0.05482	3442.8	3881.4	7.2800
	750	0.05793	3538.3	4001.7	7.4007
	800	0.06101	3634.9	4122.9	7.5163
	850	0.06406	3732.6	4245.1	7.6275
10.000	(311.03)	(0.01803)	(2544.2)	(2724.5)	(5.6139)
	350	0.02242	2698.1	2922.2	5.9425
	400	0.02641	2832.0	3096.1	6.2114
	450	0.02975	2943.6	3241.1	6.4194
	500	0.03278	3046.2	3374.0	6.5971
	550	0.03563	3144.6	3500.9	6.7561
	600	0.03836	3241.1	3624.7	6.9022
	650	0.04101	337.1	3747.1	7.0385
	700	0.04359	3433.1	3869.0	7.1671
	750	0.04613	3529.7	3991.0	7.2893
	800	0.04863	3627.2	4113.5	7.4062
	850	0.05110	3725.7	4236.7	7.5184
15.000	(342.19)	(0.01034)	(2455.0)	(2610.1)	(5.3092)
	350	0.01147	2519.3	2691.3	5.4404
	400	0.01565	2739.9	2974.7	5.8799
	450	0.01845	2879.9	3156.6	6.1410
	500	0.02080	2997.3	3309.3	6.3452
	550	0.02292	3104.9	3448.8	6.5201
	600	0.02490	3207.9	3581.5	6.6767
	650	0.02679	3308.6	3710.5	6.8204
	700	0.02862	3408.3	3837.6	6.9544
	750	0.03039	3507.8	3963.7	7.0808
	800	0.03213	3607.6	4089.6	7.2009
	850	0.03384	3708.1	4215.6	7.3158
20.000	(365.80)	(0.005874)	(2296.1)	(2413.6)	(4.9330)
	400	0.009946	2617.9	2816.9	5.5521
	450	0.01270	2806.8	3060.8	5.9026
	500	0.01477	2944.1	3239.4	6.1417
	550	0.01655	3063.0	3393.9	6.3355
	600	0.01817	3173.3	3536.7	6.5039
	650	0.01969	3279.2	3672.9	6.6557
	700	0.02113	3382.8	3805.5	6.7955

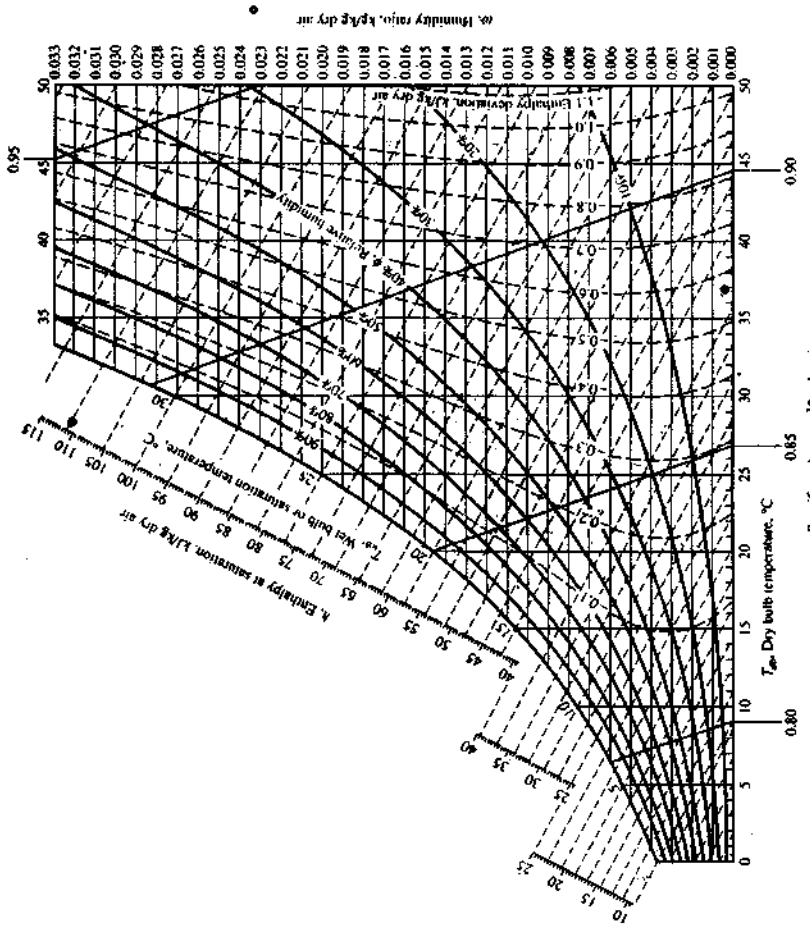
	750	0.02253	3485.4	3936.0	6.9262
	800	0.02388	3587.8	4065.4	7.0498
	850	0.02521	3690.3	4194.4	7.1673
25,000	500	0.01112	2886.1	3164.2	5.9616
	550	0.01272	3018.6	3336.5	6.1778
	600	0.01413	3137.3	3490.4	6.3593
	650	0.01542	3249.0	3634.5	6.5198
	700	0.01664	3356.8	3773.0	6.6659
	750	0.01781	3462.7	3908.0	6.8012
	800	0.01894	3567.6	4041.1	6.9282
	850	0.02003	3672.3	4173.1	7.0485
30,000	500	0.008676	2823.2	3083.5	5.7936
	550	0.01016	2972.0	3276.8	6.0362
	600	0.01143	3100.1	3443.1	6.2324
	650	0.01258	3218.0	3595.5	6.4022
	700	0.01365	3330.4	3740.1	6.5547
	750	0.01467	3439.7	3879.8	6.6948
	800	0.01564	3547.3	4016.7	6.8254
	850	0.01659	3654.2	4151.8	6.9484
35,000	600	0.009511	30619	3394.7	6.1174
	650	0.01056	3186.5	3556.0	6.2971
	700	0.01152	3303.6	3706.9	6.4563
	750	0.01243	3416.5	3851.6	6.6012
	800	0.01330	3526.9	3992.2	6.7355
	850	0.01413	3636.0	4130.4	6.8614
40,000	650	0.009046	3154.5	3516.3	6.2012
	700	0.009930	3276.6	3673.8	6.3673
	750	0.01075	3393.1	3823.3	6.5171
	800	0.01154	3506.4	3967.8	6.6551
	850	0.01229	3617.7	4109.2	6.7838



চার্ট-১ : পানির TS ডায়াগ্রাম।



চার্ট-২ : পানির hs ডায়াগ্রাম।



চার্ট–৩ : সাইক্রোমেট্রিক চার্ট।

গ্রন্থপঞ্জি

১। Russel, L.D and Adebiyi, G.A. Classical Thermodynamics, 1993 Saunders College Publishing

২। Van Wylen, G.J, Sonntag, R.E. & Borgnakke, C. Fundamentals of Classical Thermodynamics, 1994, John Wiley and Sons.

৩। Faires, V.M. Thermodynamics, 1970. The McMillan Company

৪। Jones, J.B & Dugan, R.E. Engineering Thermodynamics, 1996 Prentice-Hall. International Inc.

৫। Howell, J.R & Buckius R,O. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 2nd Edition 1992 McGraw-Hill Inc.

৬। নীলুফার আক্তার ; তাপ ও তাপগতিবিদ্যা, ১৯৯৩, বাংলা একাডেমী।

৭। Raymer, J. Basic Engineering Thermodynamics, Fifth Edition 1996. Addison-Wesley.

৮। Gordon, R & Yon, M. Engineering Thermodynamics. Fourth Edition (Reprint) 1999. Addison-Wesley.

৯। Hossain, T. Text Book of Heat. (Reprint) 1996. Variety Books.

১০। বিজ্ঞান বিশ্বকোষ ১ম খণ্ড, বাংলা একাডেমী, ১৯৯৮

১১। Schaum's Outline Series (Thermodynamics) 1976. McGraw-Hill Book Company.

১২। Merle, C.P., Craig, W.S. Engineering Thermodynamics, 1996. McGraw-Hill Book Company.

১৩। Goodgen, E.M. Principles of Engineering Thermodynamics. 1984. MacMillan Publishers Ltd.

১৪। Moran, M.J and Shapiro, H.N. Engineering Thermodynamics, 2000 John Wiley and Sons.

১৫। Francis, F. Huang. Engineering Thermodynamics, 1976, Mac Millan Publishing Co. Inc.

১৬। Holman, J.P. Thermodynamics. 1988. McGraw Hill Book Company.

১৭। Karlekar, B.V. Thermodynamics for Engineers, 1983. Prentice-Hall, Inc.

১৮। আ.ও.ম. আবদুল আহাদ ও কামাল আহমেদ ; পরমাণু-চুল্লী : তত্ত্ব ও প্রযুক্তি, ১৯৯২, বাংলা একাডেমী, ঢাকা।

নির্ঘণ্ট

অটো চক্র ১১৯
অন্তস্থ শক্তি ১৯
অপ্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া ৩৪
অবস্থা ৪
আপেক্ষিক আর্দ্রতা, আপেক্ষিক তাপ, আর্দ্রতার অনুপাত ৭৭
আংশিক চাপ ও মোট চাপ ৭৫
উন্মুক্ত ব্যবস্থা ২
এনট্রপি ৬৭
এনথালপি ২২
কার্নো চক্র ৪২
গ্যাস ক্ষেত্র (বাংলাদেশের) ১০৬
গ্যাস টারবাইন চক্র ১২৩
জ্বালানি ১০৫
ডিজেল চক্র ১২১
তাপগতিবিদ্যার শূন্য সূত্র ৮
তাপগতিবিদ্যার প্রথম সূত্র, প্রথম সূত্রের অনুসিদ্ধান্ত ১৮
তাপগতিবিদ্যার দ্বিতীয় সূত্র ৩২
তাপগতিবিদ্যার তৃতীয় সূত্র ৮
তাপগতীয় ব্যবস্থা ১
দ্বিতীয় সুত্রের ব্যবহার ৩৩
ধর্ম ৩
পারমাণবিক চুল্লি ৬২
পরিমণ্ডল/পরিপার্শ্ব ১
পলিট্রপিক প্রক্রিয়া ২৩
প্রত্যাবর্তী প্রক্রিয়া, প্রত্যাবর্তী চক্র ৩৪
প্লাঙ্কের সূত্র ৩২
বাষ্পের বিভিন্ন চক্র– রিজেনারেটিভ এবং রিহিট ১২৮
বিশুদ্ধবস্তু ৯
ব্রেটন গ্যাস টারবাইন ১২৩
রেফ্রিজারেশন ১৩০
র‍্যাঙ্কিন চক্র ৫১
শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ ৮৩
স্টইকিওমেট্রিক মিশ্রণ ১১৪

পরিভাষা

অতিতাপিত	superheated
অনমনীয়	rigid
অনুসিদ্ধান্ত	corollary
অন্তরক	insulator
অন্তস্থ শক্তি	internal energy
অপ্রত্যাবর্তী	irreversible
অপ্রবাহী প্রক্রিয়া	non flow process
অস্থায়ী	transient
অস্থিতিস্থাপক	inelastic
আকার	shape
আগম দ্বার	inlet
আদর্শ গ্যাস	ideal gas
আধার	vessel
আপাত স্থির	quasistatic
আপেক্ষিক	specific
আপেক্ষিক তাপ	specific heat
আপেক্ষিক আর্দ্রতা	relative humidity
আয়তন	volume
আর্দ্রতার অনুপাত	humidity ratio.
ঋণাত্মক	negative
কম্পাংক	frequency
কার্যকর ফ্লুইড	working fluid
ক্রান্তি	critical
গতিশক্তি	kinetic energy
ঘর্ষণ	friction
চক্র	cycle

চলরাশি	variable
চাপ	pressure
চুল্লি	reactor
জ্বালানি	fuel
তল	surface/plane
তাপগতিবিদ্যা	thermodynamics
তাপধারণ ক্ষমতা	heat capacity
তাপমাত্রা	temperature
দক্ষতা	efficiency
দহন	combustion
দাহ্য	combustible
ধনাত্মক	positive
ধর্ম	property
ধ্রুব	constant
ধ্রুব প্রবাহ	steady flow
নমুনা	sample
নিবিড় ধর্ম	intensive property
নির্গম দ্বার	outlet/exit
নিষ্কাশন	exhaust
পরম তাপমাত্রা	absolute temperature
পরম শূন্য তাপমাত্রা	absolute zero temperature
পরিপার্শ্ব	surroundings
পরিবর্তনশীল	deformable
পারমাণবিক	nuclear
পুনরুৎপাদক	regenerative
প্রকৃত গ্যাস	real gas
প্রক্রিয়া	process
প্রত্যাবর্তী	reversible

প্রবাহ	flow
প্রবাহি প্রক্রিয়া	flow process
প্রসারণ	expansion
প্রাপ্যতা	availability
বদ্ধ ব্যবস্থা	closed system
বিক্রিয়া	reaction
বিচ্ছিন্ন ব্যবস্থা	isolated system
বিনিময়	exchange
বিভাজন	fission
বিরতিহীন	perpetual
বিস্তৃত	extensive
বেষ্টনী	boundary
ব্যবস্থা	system
ভর	mass
মৌলিক একক	fundamental unit
রুদ্ধতাপীয় প্রক্রিয়া	adiabatic process
রৈখিক	linear
লব্ধ একক	derived unit
লেখচিত্র	graph
শক্তি	energy
শান্ত প্রবাহ	laminar flow
শীতক	coolant
শীতাতপ নিয়ন্ত্রণ	air conditioning
সংকোচন	contraction
সংজ্ঞা	definition
সংপৃক্ত	saturated
সর্বজনীন গ্যাস ধ্রুবক	universal gas constant
সমীকরণ	equation

সমোষ্ণ প্রক্রিয়া	isothermal process
সহগ	coefficient
সাম্যাবস্থা	equilibrium
সারণি	table
স্থানাংক	coordinate
স্থিতি অবস্থা	steady state
স্থিতি শক্তি	potential energy
স্থিতিস্থাপক	elastic
সুপ্ত তাপ	latent heat
সুষম	homogeneous
হিমায়ক	refrigerant

BANSDOC Library
Accession No. 17938

বিশিষ্ট পরমাণু প্রকৌশলী অধ্যাপক মোহাম্মদ আবদুল কাইউম ১৯৪০ সালে ঢাকা জেলায় জন্মগ্রহণ করেন। তিনি ১৯৬১ সালে তৎকালীন আহসানউল্লাহ প্রকৌশল মহাবিদ্যালয় থেকে বি.এসসি ইঞ্জিনিয়ারিং (মেকানিক্যাল) ডিগ্রি এবং ১৯৬৪ সালে যুক্তরাজ্যের বার্মিংহাম বিশ্ববিদ্যালয় থেকে রিঅ্যাক্টর ফিজিক্স এন্ড টেকনোলজিতে এম.এসসি ডিগ্রি লাভ করেন। ১৯৬১ সালে তৎকালীন আহসানউল্লাহ ইঞ্জিনিয়ারিং কলেজের যন্ত্রকৌশল বিভাগের প্রভাষকরূপে তাঁর কর্মজীবন শুরু হয়। ১৯৬২ সালে তিনি সহকারী প্রকৌশলী হিসেবে তদানীন্তন পাকিস্তান পরমাণু শক্তি কমিশনে যোগদান করেন। ১৯৯২ সালে তিনি বাংলাদেশ পরমাণু শক্তি কমিশনের সদস্য (প্রকৌশল) হন এবং ১৯৯৩ সালে চেয়ারম্যান হিসেবে দায়িত্ব গ্রহণ করেন। তিনি ১৯৯৭ সালে অবসর গ্রহণ করেন। অধ্যাপক আবদুল কাইউম যুক্তরাজ্য, সুইডেন, জাপান ও যুক্তরাষ্ট্রে উচ্চতর গবেষণার জন্য ফেলোশীপ পেয়ে কাজ করেন। ১৯৯০ সাল থেকে ১৯৯৩ সাল পর্যন্ত 'নিউক্লিয়ার' সায়েন্স এন্ড এপ্লিকেশন' শীর্ষক জার্নালের প্রধান সম্পাদকের দায়িত্ব পালন করেন। আন্তর্জাতিক মানের জার্নালে ইতোমধ্যে তাঁর প্রায় ৪০টি গবেষণা প্রবন্ধ প্রকাশিত হয়েছে। তিনি ১৯৯৯ সালের সেপ্টেম্বর মাসে এ. এম. এ ইন্টারন্যাশনাল ইউনিভার্সিটি-বাংলাদেশ-এর অধ্যাপক হিসেবে যোগদান করেন।

ড. আবু মোঃ আজিজ-উল হক ১৯৪১ সালে ঢাকা জেলায় জন্মগ্রহণ করেন। তিনি ১৯৬৩ সালে প্রকৌশল বিশ্ববিদ্যালয় থেকে যন্ত্রকৌশল বিভাগে স্নাতক ডিগ্রি এবং ১৯৭৩ সালে New South Wales University, Australia থেকে পি.এইচ-ডি ডিগ্রি লাভ করেন। বর্তমানে তিনি প্রকৌশল বিশ্ববিদ্যালয়ে যন্ত্রকৌশল বিভাগের অধ্যাপক হিসেবে কর্মরত আছেন। তাঁর গবেষণা মূলত Heat transfer, Solar energy, Engines, Robotics ইত্যাদি বিষয়ের উপর।