Chapter-3 Vapor Compression Cycle Theory and Calculation

၃.၁ Vapor Compression Refrigeration Cycle

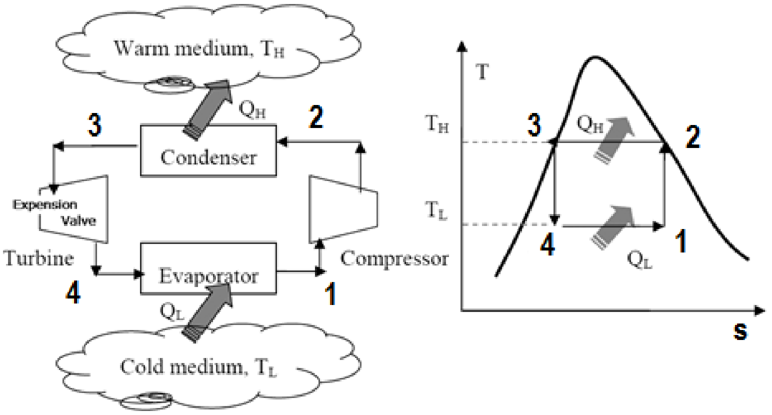
အပူချိန်မြင့်သည့် နေရာ(high temperature)မှ အပူ(heat)များသည် အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာ(low temperature)သို့ အလိုအလျောက် ကူးပြောင်းနိုင်သော်လည်း အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာ(low temperature)မှ အပူ(heat)များ အပူချိန်မြင့်သည့် နေရာ(high temperature)သို့ ရောက်သွားစေရန်အတွက် refrigeration ကိရိယာ(device) တစ်မျိုးမျိုး လိုအပ်သည်။

အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာမှ အပူ(heat)များကို အပူချိန်မြင့်သည့်နေရာသို့ ကူးပြောင်း(transfer) သွားအောင် ပြုလုပ်ပေးခြင်းကို "**refrigeration**" ဟုခေါ်သည်။ Refrigeration cycle ကို ဖြစ်စေပြီး refrigeration effect ဖြစ်အောင် ပြုလုပ်ပေးသည့် ကိရိယာများ(devices)ကို "**refrigerator**" ဟုခေါ်သည်။ Vapor compression refrigeration cycle များကို အများဆုံး တွေ့မြင်နိုင်သည်။ Refrigerant သည် အပူများကို စုပ်ယူပြီး အငွေ့အဖြစ်သို့ ပြောင်းလဲ(vaporize) သွားသည်။ Refrigerant vapor များကို compressor ဖြင့် ဖိသိပ်(compress)ပြီး ဖိအားမြင့်နေချိန်တွင် condenser အတွင်း၌ အပူများ ထွက်သွားအောင် ပြုလုပ်၍ အရည်အဖြစ်သို့ ပြောင်းလဲစေသည်။ ထို့နောက် ဖိအားမြင့်သည့် refrigerant သည် အပူဓာတ်များကို စုပ်ယူကာ ကျယ်ပြန့်(expend)လာသည်။ ထိုကဲ့သို့ ထပ်ခါထပ်ခါ ပြုလုပ်ခြင်းကို "**vapor compression refrigeration cycle**" ဟုခေါ်သည်။

၃.၂ Reversed Carnot Cycles

Carnot cycle သည် heat engine အလုပ်လုပ်ပုံကို ဖော်ပြသည့် cycle ဖြစ်ပြီး၊ refrigeration cycle သည် heat engine အလုပ်လုပ်ပုံနှင့် ပြောင်းပြန်ဖြစ်သောကြောင့် reversed Carnot cycle ဟုခေါ်ဆိုခြင်း ဖြစ်သည်။ Carnot cycle ကို ပြောင်းပြန်ဖြစ်အောင် ပြုလုပ်သောကြောင့် reversed Carnot cycle ဟုခေါ်သည်။

Refrigeration cycle သည် အပူစွမ်းအင် သို့မဟုတ် အလုပ်(work)ကို system အတွင်းသို့ ထည့်ပေးပြီး အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာ(low temperature heat source T_L)မှ အပူများ အပူချိန်မြင့်သည့်နေရာ(high temperature heat sink - T_H)သို့ ကူးပြောင်းစေသည့် reversed Carnot cycle ဖြစ်သည်။ Carnot cycle သည် reversible isothermal processes နှစ်ခုနှင့် isentropic processes နှစ်ခု ပါဝင်သည့် reversible cycle ဖြစ်သည်။ Refrigerator နှင့် heat pump တို့သည် reversed Carnot cycle ကို အခြေခံ၍ ဒီဇိုင်းလုပ်ထားသောကြောင့် Carnot refrigerator သို့မဟုတ် Carnot heat pump ဟူ၍လည်း ခေါ်ဆို လေ့ရှိသည်။



ပုံ ၃-၁ Carnot refrigerator ၏ အဓိက အစိတ်အပိုင်း(major components)များနှင့် T-s diagram

> Reversed Carnot cycle သည် မတူညီသည့် အပူချိန် နှစ်ခုအကြားတွင် အလုပ်လုပ်သည့် refrigeration cycle ဖြစ်ပြီး efficient အဖြစ်ဆုံး ဖြစ်သည်။ အမြင့်ဆုံး theoretical COP ကို ပေးနိုင်သည့် cycle ဖြစ်သည်။ Reversed Carnot cycle COP ထက် ပိုကောင်းသည့် refrigeration machine ကို တီထွင်ပြုလုပ်ရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။

ပုံ(၃-၁)တွင် ဖော်ပြထားသည့် refrigeration cycle ကို "**Reversed Carnot Cycle**" ဟု ခေါ်ဆိုသည်။ Heat engine သည် စက်မှုစွမ်းအင် သို့မဟုတ် အလုပ်(work) ရရှိရန်အတွက် လောင်စာဆီ(fuel)ကို မီးလောင်စေပြီး အပူစွမ်းအင် ထည့်ပေးသည့် Carnot cycle ဖြစ်သည်။

Refrigerator များ နှင့် heat pump များသည် အလုပ်လုပ်ပုံ တူညီသည့် ကိရိယာ(device)များ ဖြစ်ကြသည်။ အသုံးပြုပုံ သို့မဟုတ် အလိုရှိသည့် ရည်ရွယ်ချက်သာ ကွဲပြားသည်။ Refrigerator များ နှင့် heat pump များ၏ စွမ်းဆောင်ရည်(performance) ကို Coefficient Of Performance (COP) ဖြင့် ဖော်ပြလေ့ရှိသည်။

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{Net(in)}} \qquad COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{Net(in)}}$$

$$COP_{Ref,Carnot} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L - 1}} \qquad COP_{HP,Carnot} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

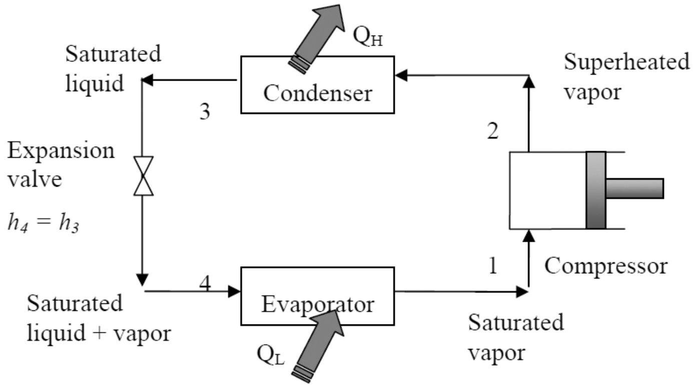
ပုံ(၃-၁)တွင် refrigerant သည် အပူ(heat)များကို isothermal နည်းဖြင့် low-temperature (T_L)source မှ စုပ်ယူသည်။ စုပ်ယူသည့် အပူပမာဏသည် Q_L (process 1-2) ဖြစ်သည်။ State 3 တွင် compressor သည် isentropical နည်းဖြင့် refrigerant များကို ဖိသိပ်(compress)သောကြောင့် အပူချိန် T_H သို့ မြင့်တက် သွားသည်။ ထို့နောက် အပူချိန်မြင့်သည့်နေရာ(high-temperature sink)သို့ isothermal နည်းဖြင့် အပူ(heat)များကို စွန့်ထုတ်ပစ်(reject)သည်။ စွန့်ထုတ်ပစ်သည့် အပူပမာဏသည် Q_H (process 2-3) ဖြစ်သည်။ Process 3-4 အတွင်း refrigerant သည် အငွေ့အဖြစ်(saturated vapor state)မှ အရည်အဖြစ်(saturated liquid state)အဖြစ်သို့ condenser အတွင်း၌ ပြောင်းလဲသွားသည်။ ထို့နောက် အပူချိန်နိမ့်သည့် state 1 သို့ isentropical နည်းဖြင့် ကျယ်ပြန့်(expand)သည်။ Carnot refrigerator နှင့် Carnot heat pump တို့၏ Coefficients Of Performance (COP)ကို အပူချိန်ဖြင့်လည်း ဖော်ပြနိုင်သည်။

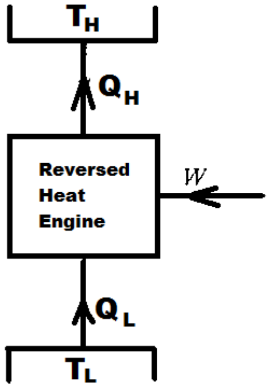
> T_L (low temperature) မြင့်၍ သော်လည်းကောင်း သို့မဟုတ် T_H (high temperature) နိမ့်သောကြောင့် သော်လည်းကောင်း T_L နှင့် T_H အကြား အပူချိန်ခြားနားချက် နည်းလာလျှင် COP တန်ဖိုး ပိုများ လာလိမ့်မည်။

Reversed Carnot cycle သည် efficient အဖြစ်ဆုံးသော refrigeration cycle ဖြစ်သည်။ လက်တွေ့လည်ပတ်နေသည့် refrigeration cycle များ၏ efficiency သည် reversed Carnot cycle ထက်ပို မကောင်းနိုင်ပေ။ Isothermal heat transfer process နှစ်ခုသည် လက်တွေ့တွင် evaporator နှင့် condenser အတွင်း၌ ဖိအားမပြောင်းလဲစေဘဲ(constant pressure) တစ်သမတ်တည်းဖြစ်အောင် ထိန်းထားရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။

၃.၃ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycles

Refrigerator များ၊ air-conditioner များ ၊ chiller များနှင့် heat pump များသည် vapor compression refrigeration ကို အခြေခံ၍ တည်ဆောက်ထားသည့် ကိရိယာများ ဖြစ်ကြသည်။





ပုံ ၃-၂ Schematic for ideal vapor compression refrigeration cycle   Reversed Heat Engine

Ideal vapor compression cycle အတွက် ယူဆချက်(assumption)များ မှာ

(က) Evaporator ၊ condenser နှင့် compressor များတွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် irreversibility များကို ထည့်သွင်း စဉ်းစားခြင်း မပြုပါ။

(ခ) ပွတ်တိုက်မှု(friction)ကြောင့် ဖြစ်ပေါ်သော ဖိအားကျဆင်းမှုများ(frictional pressure drops)ကို ထည့်သွင်း စဉ်းစားခြင်း မပြုပါ။

(ဂ) Heat exchanger နှစ်ခုဖြစ်သည့် evaporator နှင့် condenser အတွင်း၌ refrigerant သည် ပုံသေဖိအား (constant pressure)ဖြင့် စီးဆင်း(flow)နေသည်ဟု ယူဆထားသည်။

(ဃ) အနီးဝန်းကျင်သို့(surroundings) စီးကူးသွားသည့် အပူဆုံးရှုံးမှု(heat loss) မရှိဟု ယူဆထားသည်။

(င) Compression process ကို isentropic process အဖြစ် ယူဆထားသည်။

၃.၃.၁ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycles ရှင်းပြချက် (၁)

Vapor compression refrigeration cycle ကို refrigerator များ၊ chiller များ၊ air-conditioning system များ၊ heat pump များ စသည်တို့တွင် အများဆုံး အသုံးပြုကြသည်။

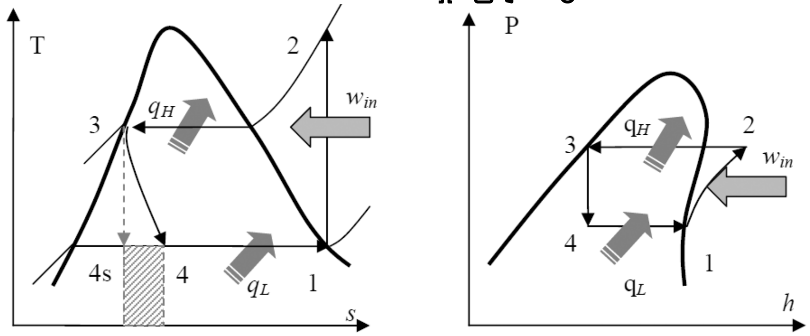
Vapor compression refrigeration cycle တွင် အောက်ပါ ဖြစ်စဉ် လေးမျိုး ပါဝင်သည်။

1-2 Isentropic compression in a compressor
2-3 Constant-pressure heat rejection in a condenser
3-4 Throttling in an expansion device
4-1 Constant-pressure heat absorption in an evaporator

Ideal vapor compression refrigeration cycle တွင် refrigerant များသည် compressor အတွင်းသို့ အငွေ့(saturated vapor)အဖြစ် ဝင်ရောက်လာသည်။ ထိုအခြေအနေကို state 1 ဟုသတ်မှတ်သည်။ Compressor သည် isentropic compression process ဖြင့် refrigerant များကို ဖိသိပ်(compress)နေစဉ် အပူချိန် မြင့်တက်လာသည်။ Compressor အထွက် state 2 မှ refrigerant များသည် condenser အတွင်းသို့ superheated vapor အဖြစ် ဝင်ရောက်သည်။ Condenser အတွင်း refrigerant များသည် အပူများကို စွန့်ထုတ်ပြီး saturated liquid အဖြစ်သို့(state 3) ရောက်ရှိသွားသည်။ Condenser အတွင်းရှိ refrigerant အပူချိန်သည် အပူစွန့်ထုတ်ခြင်းခံရသည့် အနီးဝန်းကျင်ရှိ အပူချိန်ထက် ပိုမြင့်သည်။

State 3 တွင် saturated liquid refrigerant များကို evaporator pressure သို့ရောက်အောင် expansion valve သို့မဟုတ် capillary tube သုံး၍ throttling လုပ်၍ လျှော့ချလိုက်သည့်အခါ refrigerant အပူချိန်သည် refrigerated space ၏ အပူချိန်ထက် ပိုနည်း သွားသည်။ Refrigerant များသည် evaporator (state 4) အတွင်းသို့ low-quality saturated mixture အဖြစ် ဝင်ရောက်လာသည်။ Refrigerated space မှ အပူများကို စုပ်ယူပြီး လုံးဝ ကုန်စင်အောင် အငွေ့ပျံ(evaporate)သွားသည်။ ထို့နောက် အငွေ့(saturated vapor)အနေဖြင့် evaporator အတွင်းမှ ထွက်သွားပြီး compressor အတွင်းသို့ ဝင်ရောက်ကာ နောက်ထပ် refrigeration cycle တစ်ခု စတင်သည်။ Refrigeration cycle သည် အဆက်မပြတ် လည်ပတ်နေသည့် cycle ဖြစ်သည်။

၃.၃.၂ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycles ရှင်းပြချက် (၂)



ပုံ ၃-၃ Ideal vapor compression refrigeration cycle တစ်ခု၏ T-s diagrams နှင့် P-h diagrams

State 1 မှ State 2: Internally ၊ Reversible ၊ Adiabatic (isentropic) Compression Process

Refrigerant ကို reversible ၊ adiabatic (isentropic) နည်းဖြင့် ဖိသိပ်(compression)သည်။ State 1 မှ saturated vapor များသည် state 2 သို့ superheated vapor အဖြစ်ရောက်ရှိ သွားသည်။ (S1 = S2)

$$w_{in} = h_2 - h_1$$

State 2 မှ State 3: Internally ၊ Reversible ၊ Constant Pressure Heat Rejection Process

State 2 မှ state 3 သည် internally ၊ reversible ၊ constant pressure heat rejection ဖြစ်သည်။ တစ်နည်းအားဖြင့် refrigerant မှ အပူစွန့်ထုတ်ခြင်း ဖြစ်သည်။ State 3 သို့ ရောက်ချိန်တွင် refrigerant အပူချိန်ကျဆင်းပြီး အရည်(saturated liquid)အဖြစ်သို့ ပြောင်းလဲသွားသည်။ ထိုသို့ပြောင်းလဲခြင်းကို condensation ဖြစ်သည်ဟု ခေါ်သည်။ Refrigerant မှ အပူများကို condenser water သို့မဟုတ် လေထု ထဲသို့ စွန့်ထုတ်ပစ်လိုက်သည်။

$$qH = h_2 - h_3$$

State 3 မှ State 4: Irreversible Throttling Process

အပူချိန်(temperature) နှင့် ဖိအား(pressure) ကျဆင်းသော်လည်း enthalpy မပြောင်းလဲ (constant)ပေ။ State 4 ဆီသို့ refrigerant များသည် low quality saturated mixture အဖြစ် ဝင်ရောက် သည်။

$$h_3 = h_4 \ (constant\ enthalpy)$$

State 4 မှ State 1: Internally ၊ Reversible ၊ Constant Pressure Heat Interaction Process

Refrigerant (two-phase mixture) များသည် အပူများကို စုပ်ယူပြီး ဆူပွက်(evaporated) သည်။ State point 1 တွင် saturated vapor အဖြစ်သို့ ရောက်ရှိသည်။ Refrigerant များ ဆူပွက်ရန်အတွက် လိုအပ်သည့် latent enthalpy ကို evaporator အတွင်း၌ refrigerated space မှ ရရှိသည်။ Evaporator အတွင်း၌ refrigerant ဆီသို့ ကူးပြောင်းသွားသည့် အပူပမာဏ(amount of heat transferred)ကို refrigeration load ဟု ခေါ်သည်။

$$qL = h_1 - h_4$$

မှတ်ချက်

Ideal compression refrigeration cycle သည် internally reversible cycle မဟုတ်ပေ။ အဘယ်ကြောင့်ဆိုသော် throttling လုပ်ခြင်းသည် irreversible process ဖြစ်သောကြောင့် ဖြစ်သည်။

အကယ်၍ expansion valve (throttling device) ကို isentropic turbine ဖြင့် အစားထိုးနိုင်လျှင် refrigerant သည် evaporator အတွင်းသို့ state 4s နေရာမှ (ပုံ ၃-၃) ဝင်ရောက်လာလိမ့်မည်။ ထို့ကြောင့် refrigeration capacity ပိုများ လာနိုင်သည်။ ပမာဏအားဖြင့် curve 4-4s အောက်ရှိ ဧရိယာ(area under 4-4s) နှင့် တူညီသည့် work input ပမာဏ လျော့နည်းလိမ့်မည်။ အဘယ်ကြောင့်ဆိုသော် turbine မှ အသုံးချနိုင်သည့် work တချို့ကို ထုတ်ပေးနိုင်သောကြောင့် ဖြစ်သည်။ သို့သော် လက်တွေ့ အခြေအနေတွင် expansion valve ကို turbine ဖြင့် အစားထိုးရန် အတွက် ကုန်ကျစရိတ်ပိုများခြင်းနှင့် ပို၍ ရှုပ်ထွေး ခက်ခဲခြင်းတို့ ဖြစ်နိုင်သည်။

Evaporating temperature ကို 1°C မြှင့်၍ မောင်းနိုင်လျှင် COP 2% မှ 4% အထိ ပိုကောင်းလာနိုင်သည်။ Condensing temperature ကို 1°C နိမ့်၍ မောင်းနိုင်လျှင် COP 2% မှ 4% အထိ ပိုကောင်းလာနိုင်သည်။

Vapor compression system များကို လေ့လာတွက်ချက်ရာတွင် အောက်ပါအချက်များ ပါဝင်သည်။

(က) T-s diagram နှင့် P-h chart ရေးဆွဲပါ။

(ခ) System ရှိ အဆင့်တိုင်းအတွက် principal state များ နှင့် တန်ဖိုးများ ကို ရှာဖွေပါ။

(ဂ) အဓိက process များ၌ mass ၊ energy နှင့် entropy balance equation များအသုံးပြု၍ လိုအပ်သည့် တန်ဖိုးများကို ရှာပါ။

(ဃ) Refrigeration နှင့် heat pump system များ၏ performance ၊ coefficient of performance နှင့် capacity ကို ရှာပါ။

Vapor compression system များကို engineering model ဖြင့် လေ့လာရာတွင် အောက်ပါ အဆင့်များ ပါဝင်သည်။

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ(analyze)သည်။

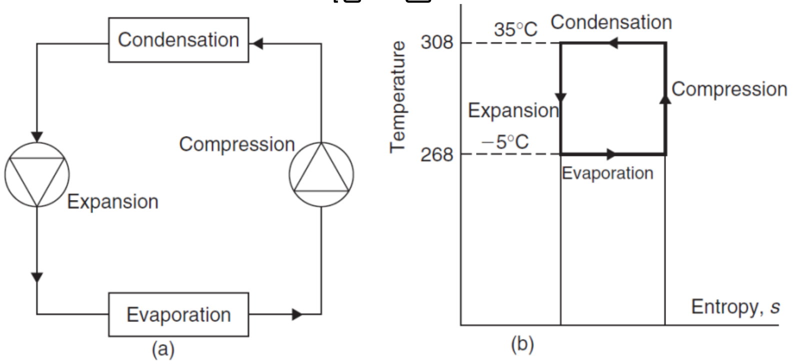
(၂) Compressor များသည် adiabatic နည်းဖြင့် compression ပြုလုပ်သည့်ဟု ယူဆတွက်ချက်သည်။

(၃) Refrigerant များသည် expansion valve နေရာတွင် throttling process ဖြစ်ပေါ်သည်။

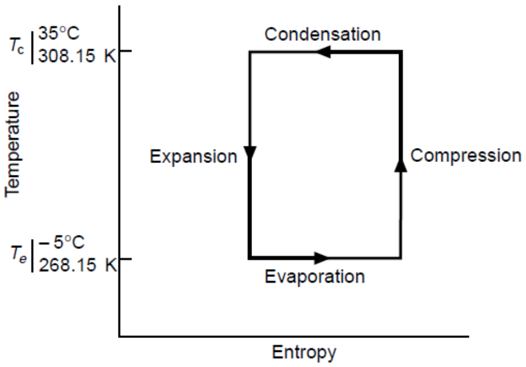
(၄) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

၃.၃.၃ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ(၁)

ပထမဦးစွာ ideal reversible cycle တစ်ခုကို စတင် လေ့လာကြည့်ကြပါစို့။ ပုံ(၃-၄)တွင် ဖော်ပြထားသည့် ideal reversible cycle တစ်ခုသည် အပူချိန် နိမ့်သည့် နေရာ(T_L)မှ အပူများသည် အပူချိန် မြင့်သည့်နေရာ(T_H)သို့ ကူးပြောင်းသည့် "**Ideal Refrigeration Cycle**" တစ်ခုဖြစ်သည်။

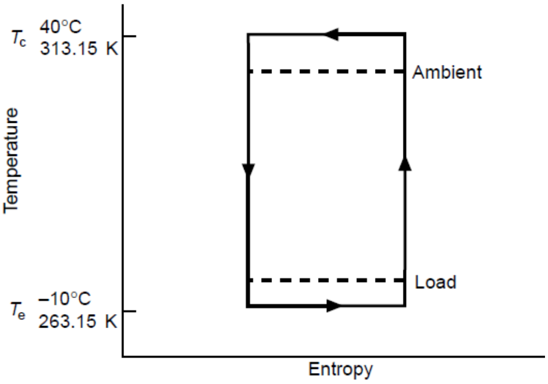


ပုံ ၃-၄(က) Ideal reversed Carnot cycle (a) circuit and (b) temperature–entropy diagram



$$COP = \frac{1}{(308.15/268.15) - 1} = 6.7$$

ပုံ ၃-၄(ခ) Ideal reversed Carnot cycle



$$COP = \frac{1}{(313.15/263.15) - 1} = 5.26$$

ပုံ ၃-၄(ဂ) Modified reversed Carnot cycle

Refrigeration cycle တွင် အသုံးပြုထားသည့် fluid ကို "**Refrigerant**" ဟုခေါ်သည်။ Refrigeration cycle တွင် ပါဝင်သည့် အဓိက component (၄)မျိုးကြောင့် process (၄)ခု ဖြစ်ပေါ်သည်။ Refrigerant သည် ထို process လေးခုလုံးသို့ ရောက်ရှိပြီး ထပ်ခါထပ်ခါ အဆက်မပြတ် လည်ပတ်နေသည်။

Compression process နှင့် expansion process နှစ်ခုသည် ပုံ(၃-၄)တွင် မျဉ်းမတ်များဖြင့် ဖော်ပြထားသည့် constant entropy (isentropic) process များ ဖြစ်ကြသည်။ Entropy မပြောင်းလဲသည့် (isentropic) process သည် reversible process သို့မဟုတ် ideal process ဖြစ်သည်။ Entropy မပြောင်းလဲ သောကြောင့် entropy generation မဖြစ်ပေါ်ပေ။ Entropy generation မဖြစ်ပေါ်သောကြောင့် reversible process ဖြစ်သည်။ လက်တွေ့တွင် မဖြစ်နိုင်သည့် ideal process ဖြစ်သည်။

System မှ အပူများ စုပ်ယူသွားခြင်း(heat addition to refrigerant) နှင့် အပူများစွန့်ထုတ်ခြင်း(rejection of heat)တို့ ဖြစ်နေချိန်တွင် အပူချိန် ပြောင်းလဲခြင်းမရှိ(constant temperature)ဟု ယူဆ ထားသောကြောင့် မျဉ်းဖြောင့်များ(horizontal lines)ဖြင့် ပုံ(၃-၄-က-b)တွင် ဖော်ပြထားသည်။

ဖိသိပ်ခြင်း(compression) ပြုလုပ်နေချိန်တွင် system အတွင်းသို့ စွမ်းအင် သို့မဟုတ် အလုပ်(work) ထည့်ပေးရန် လိုအပ်သည်။ Expansion ဖြစ်နေချိန်တွင် စွမ်းအင် သို့မဟုတ် အလုပ်(work) များ ပြန်ထွက်လာသည်။

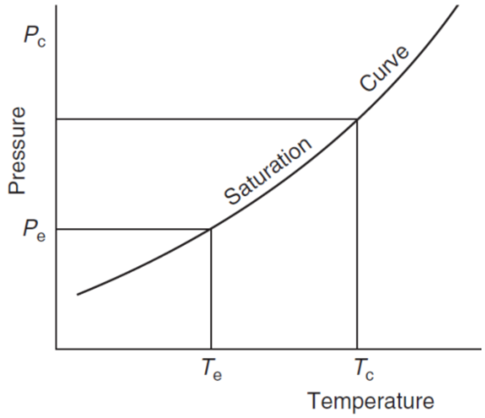
Evaporation ဖြစ်နေချိန်တွင် အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာမှ အပူ(heat)များကို system က စုပ်ယူသည်။ Condensation ဖြစ်ပေါ်နေချိန်တွင် system အတွင်းမှ အပူ(heat)များကို အပြင်သို့ စွန့်ထုတ်သည်။ ထည့်ပေးရသည့် စွမ်းအင် သို့မဟုတ် အလုပ်(work) နှင့် ပြန်ရရှိနိုင်သည့် cooling effect တို့မှ Coefficient Of Performance (COP)ကို တွက်ယူနိုင်သည်။

Vapor compression cycle ကို refrigeration လုပ်ငန်းများအတွက် အသုံးပြုသည်။ Refrigerant များသည် အပူချိန်ကို လိုက်၍ ဆူပွက်ခြင်း(boiling) နှင့် condensation ဖြစ်ခြင်းတို့ ဖြစ်ပေါ်သည်။ Refrigerant က အပူကို စုပ်ယူလျှင် ဆူပွက်ခြင်း(boiling)ဖြစ်ပေါ်ပြီး အပူစွန့်ထုတ်လျှင် condensation ဖြစ်ပေါ်သည်။ Refrigerant များ၏ အပူချိန် (evaporation temperature နှင့် condensing temperature)သည် ဖိအား(pressure)ကို လိုက်၍ ပြောင်းလဲနေသည်။ Refrigerant ၏ အပူချိန်သည် freezing point နှင့် critical temperature တို့ထက် ကျော်လွန်ရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။

ပုံ(၃-၅)တွင် Te သည် evaporation temperature ဖြစ်ပြီး Tc သည် condensing temperature ဖြစ်သည်။ Pe သည် evaporation pressure ဖြစ်ပြီး Pc သည် condensing pressure ဖြစ်သည်။

ဆူပွက်(boiling)ရန်အတွက် refrigerant များသည် အပူ(latent heat of evaporation) များကို စုပ်ယူရသည်။ Condensing ဖြစ်ရန်အတွက် latent heat များကို ပြန်စွန့်ထုတ်ပစ်ရသည်။ ထို့ကြောင့် chiller ၏ evaporator

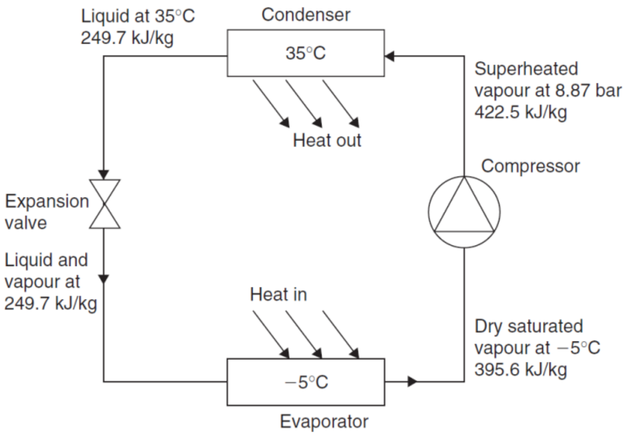
အတွင်း၌ refrigerant သည် အပူများကို စုပ်ယူ(absorb)ရသည်။ Chiller ၏ condenser အတွင်း၌ refrigerant သည် အပူများကို စွန့်ထုတ်(reject)သည်။



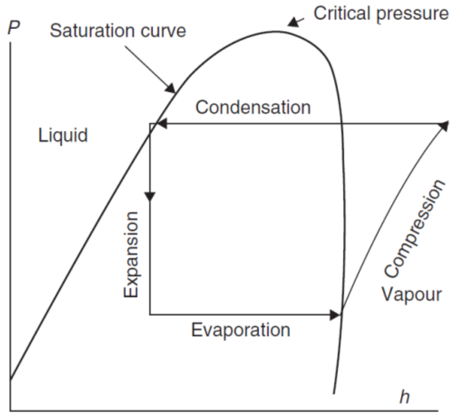
ပုံ ၃-၅ Evaporation and condensation

Evaporator အတွင်း၌ အပူချိန်နှင့် ဖိအားနိမ့်သည့် အချိန်တွင် အပူကို စုပ်ယူလိုက်သောကြောင့် အပူချိန် မြင့်တက် လာပြီး အငွေ့ပျံခြင်း(vaporization)ဖြစ်ပေါ်သည်။ အငွေ့(vapor) များကို စက်ဖြင့် ဖိသိပ်(compress) သောကြောင့် ဖိအား မြင့်တက်လာသည်။

ဖိအားမြင့်တက်မှုကြောင့် corresponding saturation temperature လည်း မြင့်တက်သည်။ အပူချိန်မြင့်သည့် အငွေ့ အဖြစ်မှ အပူများကို စွန့်ထုတ်ပြီး အရည်အဖြစ်သို့ ပြောင်းလဲသည်။



ပုံ ၃-၆ Simple vapor compression cycle with pressure and enthalpy values for R134a



ပုံ ၃-၇ Vapor compression cycle ကို ဖော်ပြထားသည့် Pressure–enthalpy diagram

ဥပမာ- ပုံ(၃-၆)တွင် ဖော်ပြထားသည့်အတိုင်း အပူချိန် -5°C ရှိသည့်နေရာ(evaporator)မှ အပူများကို အပူချိန် 35°C ရှိသည့်နေရာ(condenser)သို့ စွန့်ထုတ် (reject)ပစ်ရန် အတွက် Carnot COP (ideal COP) ကို ရှာပါ။

အဖြေ - အပူချိန်များကို absolute temperature သို့ပြောင်းပါ။ -5°C သည် 268 K နှင့် အနီးစပ်ဆုံး တူညီသည်။ 35°C သည် 308 K နှင့် အနီးစပ်ဆုံး တူညီသည်။

$$COP = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

$$Carnot\ COP = \frac{268}{308 - 268} = 6.7$$

အပူချိန် -5°C ရှိသည့်နေရာမှ အပူများကို အပူချိန် 35°C ရှိသည့်နေရာသို့ စွန့်ထုတ်(reject)ပစ်ရန် အတွက် COP 6.7 ထက် ပိုကောင်းသည့် စက်ကို တည်ဆောက်ရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။

ပုံ(၃-၇)တွင် refrigeration cycle ကို ဖော်ပြထားသည်။ Evaporation process ဖြစ်နေချိန်တွင် အပူချိန် နိမ့်သည့်နေရာ သို့မဟုတ် working fluid မှ အပူများကို refrigerant က စုပ်ယူလိုက်သောကြောင့် cooling effect သို့မဟုတ် refrigeration effect ဖြစ်ပေါ်သည်။ တစ်နည်းအားဖြင့် working fluid နှင့် refrigerant တို့၌ enthalpy ပြောင်းလဲခြင်း ဖြစ်ပေါ်သည်။

P–h diagram

Vapor comporession cycle ကို လေ့လာရန်အတွက် အင်ဂျင်နီယာများသည့် pressure – enthalpy diagram သို့မဟုတ် P–h diagram ကို အသေးစိတ် နားလည်သဘောပေါက်ရန် လိုအပ်သည်။ P–h diagram သည် substance များ၏ liquid phase နှင့် gas phase တို့၏ ပြောင်းလဲပုံကို အလွယ်ကူဆုံးနည်းဖြင့် ဖော်ပြထားသည့် ဂရပ် ဖြစ်သည်။

ပုံ(၃-၇) ၏ vertical axis တွင် pressure (P) တန်ဖိုးများကို ဖော်ပြထားသည်။ ရေပြင်ညီလိုင်း(horizontal line)တွင် enthalpy(h) တန်ဖိုးများကို ဖော်ပြထားသည်။ Saturation curve သည် အရည်အနေဖြင့်သာ(pure liquid) ရှိနိုင်သည့် နေရာနှင့် အငွေ့သက်သက်(pure gas or vapor)ရှိနေသည့် နေရာကို ပိုင်းခြားထားသည့် လိုင်းဖြစ်သည်။

> Vapor ဟုဖော်ပြထားသည့် နေရာ(region)တွင် refrigerant သည် superheated vapor အနေဖြင့် ရှိနေလိမ့်မည်။ Liquid ဟု ဖော်ပြထားသည့် နေရာ(region)တွင် refrigerant သည် subcooled liquid အနေဖြင့် ရှိနေလိမ့်မည်။

Curve ၏ အပေါ်ဘက်နေရာတွင် refrigerant သည် အရည်(liquid)ဖြစ်မည်၊ အငွေ့(vapor)ဖြစ်မည် သို့မဟုတ် နှစ်မျိုးစလုံး ဖြစ်နေမည် ဟူ၍ အတိအကျပြောရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။ အငွေ့(vapor)အခြေအနေတွင် ဖြစ်ပေါ်နေသည့် ဖိအားထက် ပိုမြင့်မားလျှင် refrigerant သည် အရည်(liquid) မဖြစ်နိုင်တော့ပေ။

Curve ၏ ထိပ်ဆုံး ဖိအား(pressure)ကို "**critical pressure**" ဟုခေါ်သည်။ Curve ၏ အတွင်းဘက်တွင် အရည်(liquid)အသွင် နှင့် အငွေ့(vapor)အသွင် နှစ်မျိုး ရောနှောနေသည့် အခြေအနေ(mixture of liquid and vapor)ဖြစ်သည်။ ပုံ(၃-၇)တွင် ပြထားသည့် အတိုင်း vapor compression cycle ကို P–h diagram ပေါ်တွင် ရေးဆွဲနိုင်သည်။

Evaporation process သို့မဟုတ် refrigerant အငွေ့ပျံခြင်း(vaporization)ဖြစ်စဉ်သည် ဖိအား မပြောင်းလဲသည့် ဖြစ်စဉ်(constant pressure process) ဖြစ်သောကြောင့် ရေပြင်ညီလိုင်း(horizontal line)ဖြင့် ဖော်ပြထားသည်။

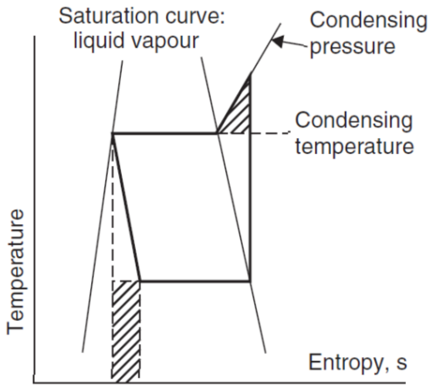
Compression process တွင် စွမ်းအင်(energy)ကို အသုံးပြု၍ ဖိသိပ်ခြင်း(compression) ပြုလုပ်သောကြောင့် refrigerant vapor ၏ အပူချိန် မြင့်တက်လာပြီး enthalpy လည်း မြင့်တက်လာသည်။ ထို့ကြောင့် Compression process ကို ဒေါင်လိုက်မျဉ်း(vertical line)ဖြင့် အောက်မှ အထက်သို့ ဖော်ပြထားသည်။ ဖိသိပ်ခြင်း(compression) လုပ်ပြီးချိန်တွင် superheated အပူချိန်သို့ ရောက်နေသောကြောင့် saturation curve အပြင်ဘက်သို့ ရောက်သွားသည်။ ဖိသိပ်ခြင်းကြောင့် ဖြစ်ပေါ်လာသည့်အပူ(heat of compression)များကြောင့် refrigerant ၏ enthalpy မြင့်တက် သွားသည်။ Adiabatic compression ဟု သတ်မှတ်သည်။

နောက်ဆုံးရောက်ရှိသည့် compression temperature (discharge temperature)သည် condensation temperature ထက် ပိုမြင့်သည်။ Condensation စတင် မဖြစ်ပေါ်ခင် refrigerant vapor သည် အေးသွားသည်။ ထို့ကြောင့် condensation temperature ထက် ပိုမြင့်နေသည့် အပူချိန်မှ condensation temperature သို့ရောက်ရန် အပူအနည်းငယ်ခန့်ကို စွန့်ထုတ်သည်။ ဤအချက်သည် ideal cycle နှင့် မတူညီသည့် အချက်ဖြစ်သည်။ Actual condensation process ကို saturation curve အတွင်း၌ ရေပြင်ညီလိုင်း(horizontal line) ဖြင့် ဖော်ပြနိုင်သည်။

ပုံ(၃-၈)တွင် simple vapor compression cycle ကို temperature entropy diagram ဖြင့် ဖော်ပြထားသည်။ မျဉ်းစောင်းများခြစ်ထားသည့်နေရာ(shaded areas)သည် reversed Carnot cycle နှင့် မတူညီသည့် အချက် ဖြစ်သည်။

Adiabatic compression process သည် condensing temperature ရောက်သည်အထိ ဖြစ်နေလိမ့်မည်။ မျဉ်းစောင်းများခြစ်ထားသည့်နေရာ(shaded areas)သည် ပိုလုပ်ရသည့် အလုပ်(extra-work)ပမာဏ ဖြစ်သည်။

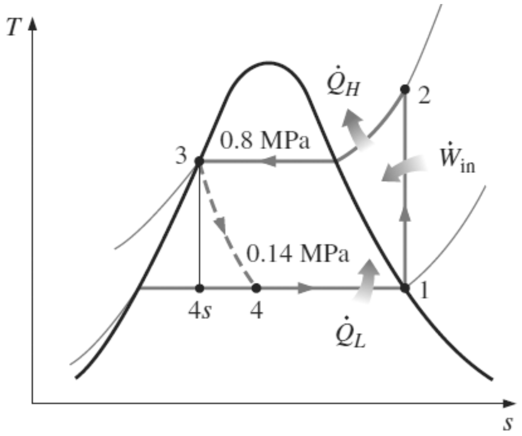
အပူချိန်မပြောင်းလဲသည့် (constant temperature) compression process ကို Isothermal compression process ဟုခေါ်သည်။ Isothermal compression ဖြစ်အောင်လုပ်နိုင်လျှင် ပိုလုပ်ရသည့် အလုပ်(extra-work) မလိုအပ်ပေ။ တစ်နည်းအားဖြင့် condensing pressure သို့ ရောက်အောင်သာ ဖိသိပ်(compress)လျှင် extra work ကို ရှောင်လွှဲနိုင်သည်။



Expansion ဖြစ်စဉ်သည် enthalpy မပြောင်းလဲသည့် ဖြစ်စဉ် (constant enthalpy process) ဖြစ်သည်။ P–h diagram ပေါ်တွင် ဒေါင်လိုက်မျဉ်း(vertical line)ဖြင့် ဖော်ပြသည်။

Expansion ဖြစ်နေစဉ်အတွင်း အပူစုပ်ယူခြင်း(absorption) သို့မဟုတ် စွန့်ထုတ်ခြင်း (rejection) မဖြစ်ပေါ်ပေ။ Refrigerant များသည် valve ကို ဖြတ်သန်း စီးဆင်း သွားခြင်းသာ ဖြစ်သည်။

ပုံ ၃-၈ Ideal vapor compression cycle တစ်ခု၏ temperature–entropy diagram



Valve ကြောင့် ဖြစ်ပေါ်သွားသည့် ဖိအား ကျဆင်းခြင်း (reduction in pressure) သည် temperature နိမ့်ဆင်းခြင်းနှင့် အချိုးညီသည်။ Valve ကို ဖြတ်သွားနေစဉ် refrigerant တချို့သည် အငွေ့(vapor)အဖြစ်သို့ ပြောင်းလဲသွားသည်။ Working fluid သို့မဟုတ် refrigerant ၏ ထုထည်(volume) ပိုများ လာသည်။ Expansion ဖြစ်အောင် ပြုလုပ် ပေးသည့် valve ဖြစ်သောကြောင့် "**expansion valve**" ဟု ခေါ်သည်။

ပုံ ၃-၉(က) ဥပမာတွင် ဖော်ပြထားသည့် ideal vapor compression refrigeration cycle ၏ T-s diagram

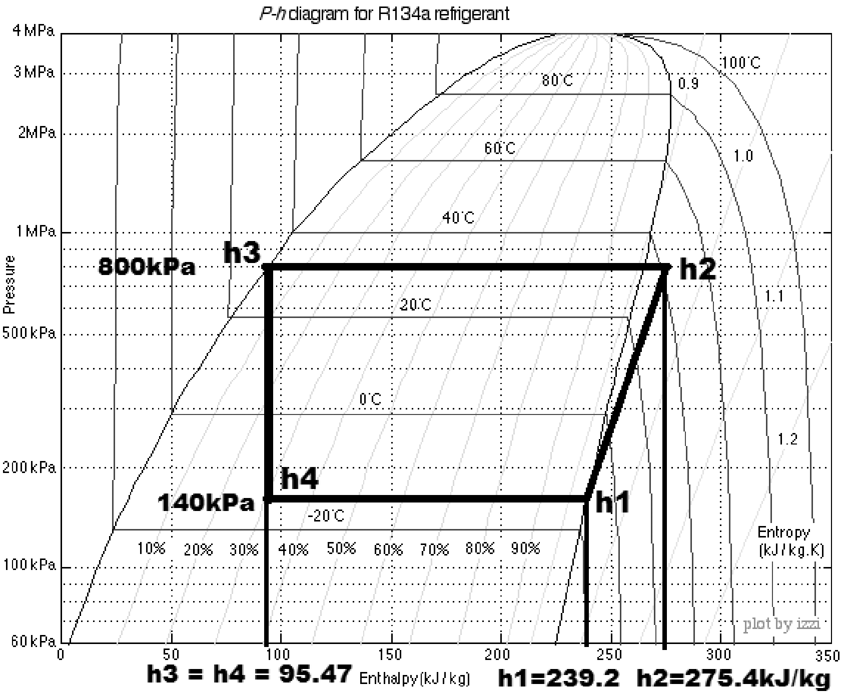
Expansion process တွင် စွမ်းအင်(energy) ပြန်ရအောင်(recover) ပြုလုပ်လိုလျှင် expansion valve သုံးမည့်အစား တာဘိုင်(turbine)ကို အသုံးပြုနိုင်သည်။ ပြန်လည်ရရှိနိုင်သည့် စွမ်းအင်(recover energy)ပမာဏကို ပုံ(၃-၈)တွင် မျဉ်းစောင်းများခြစ်ထားသည့် ထောင့်မှန်စတုဂံနေရာ(shaded rectangle)ဖြင့် ဖော်ပြထားသည်။

ပုံ(၃-၉)မှ T-S diagram တွင် ရေးဆွဲထားသည့် process curve အောက်ရှိ ဧရိယာသည် reversible processes ၌ heat transfer ဖြစ်ပေါ်သည့် ပမာဏကို ဖော်ပြသည်။ Area under the process curve (4-1)သည် evaporator အတွင်း၌ refrigerant မှ စုပ်ယူ လိုက်သည့် အပူပမာဏ(heat absorbed)ကို ဖော်ပြသည်။ Area under the process curve(2-3)သည် condenser အတွင်း၌ refrigerant မှ အပူများကို စွန့်ထုတ်သည့်(heat rejected) ပမာဏကို ဖော်ပြသည်။ အကြမ်းအားဖြင့်(rule of thumb) evaporating temperature ကို 1°C မြှင့်တင်တိုင်း သို့မဟုတ် condensing temperature ကို 1°C လျှော့ချနိုင်တိုင်း COP (၂) ရာခိုင်းနှုန်းမှ (၃) ရာခိုင်းနှုန်း ပိုကောင်း နိုင်သည်။

၃.၃.၄ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ (၂)

Refrigerant R-134A ကို အသုံးပြုထားသည့် refrigerator သည် ဖိအား 0.14 MPa နှင့် 0.8 MPa အကြားတွင် မောင်းရန် ဒီဇိုင်းလုပ်ထားသည့် ideal vapor compression refrigeration cycle ဖြစ်သည်။

Refrigerant စီးနှုန်း(mass flow rate) သည် 0.05 kg/s ဖြစ်လျှင် အောက်ပါတို့ကို ရှာပါ။
(၁) Rate of heat removal from the refrigerated space and the power input to the compressor,
(၂) Rate of heat rejection to the environment နှင့်
(၃) Refrigerator ၏ COP ကို ရှာပါ။



ပုံ ၃-၉(ခ) ဥပမာတွင် ဖော်ပြထားသည့် ideal vapor compression refrigeration cycle ၏ T-s diagram

အဖြေ-

Refrigerator များ အားလုံးသည် ဖိအားနှစ်မျိုး အကြားတွင် vapor compression refrigeration cycle ကို အခြေခံ၍ တည်ဆောက်ထားကြသည့် ကိရိယာများဖြစ်သည်။

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

ပုံ(၃-၉က)တွင် refrigeration cycle ၏ T-s diagram ဖြင့် လေ့လာပုံကို ဖော်ပြထားသည်။ Ideal vapor compression refrigeration cycle ဖြစ်သောကြောင့် compressor သည် isentropic ဖြစ်သည်၊ Condenser မှ refrigerant များသည် saturated liquid အနေဖြင့် ထွက်သွားသည်။ Compressor အတွင်းသို့ saturated vapor ဝင်ရောက်လာသည်ဟု ယူဆထားသည်။

Refrigerant R-134A ဇယားမှ state လေးခုမှ တစ်ခုချင်းစီ၏ refrigerant enthalpy များကို ဖတ်ယူပါသည်။

State 1

State 1 သည် saturated liquid လိုင်းပေါ်တွင် တည်ရှိသောကြောင့် saturated refrigerant- 134a- Pressure table(စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12)မှ ဖတ်ယူရသည်။ အဘယ်ကြောင့်ဆိုသော် ပုစ္ဆာတွင် pressure တန်ဖိုး (0.14 MPa) ပေးထားသောကြောင့် ဖြစ်သည်။ စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12 ၌ pressure 140 kPa အတန်းနှင့် saturated vapor h_g colum တို့ ဆုံသည့်နေရာမှ ဖတ်ယူလျှင် 239.16 kJ/kg ရသည်။

P1 = 0.14 MPa → $h1 = h_{g\ @\ 0.14\ MPa} = 239.16$ kJ/kg

$S1 = S_{g\ @\ 0.14\ MPa} = 0.94456$ kJ/kg K

State 2

State 2 သည် superheated region နေရာတွင် ရောက်ရှိနေသောကြောင့် (စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13) superheated refrigerant-134a ဇယားမှ ဖတ်ယူရသည်။ စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13 ကို ဖတ်ရာတွင် သက်ဆိုင်သည့် ဖိအားကို ပထမဦးစွာ ရွေးချယ်ရသည်။ ဤဥပမာ အရ P2 တန်ဖိုးသည် 0.8 MPa ဖြစ်သောကြောင့် 0.8 MPa ဇယားငယ်နေရာမှ ဖတ်ယူရသည်။ စာမျက်နှာ 2-34 အလယ်နေရာတွင် 0.8 MPa ဇယားငယ် ရှိသည်။ S2 နှင့် S1 တူညီသည်။ တစ်နည်းအားဖြင့် entropy generation မဖြစ်ပေါ်ပေ။ 0.8 MPa ဇယားငယ်မှ S တန်ဖိုး 0.94456 kJ/kg K မှ h2 တန်ဖိုးကို ဖတ်ယူရသည်။ h2 တန်ဖိုးကို တိုက်ရိုက် ဖတ်ယူရန် မဖြစ်နိုင်သောကြောင့် S=0.9480 kJ/kg K လိုင်းမှ h တန်ဖိုးကို ဖတ်၍ တွက်ယူရခြင်း ဖြစ်သည်။

$$\left.\begin{array}{l} P2 = 0.8\ \text{MPa} \\ S2 = S1 = 0.94456\ \text{kJ/kg K} \end{array}\right\}\ h2 = 275.39\ \text{kJ/kg}$$

State 3

State 3 သည် saturated liquid လိုင်းပေါ်တွင် တည်ရှိသောကြောင့် saturated refrigerant- 134a- Pressure table (စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12)မှ ဖတ်ယူရသည်။ စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12 ၌ pressure 800 kPa အတန်းနှင့် saturated vapor h_f colum တို့ ဆုံသည့်နေရာမှ ဖတ်ယူလျှင် 95.47 kJ/kg ရသည်။

$$P3 = 0.8\ \text{MPa} \rightarrow h3 = h_{f\ @\ 0.8\ MPa} = 95.47\ \text{kJ/kg}$$

State 4

h4 တန်ဖိုးသည် နှင့် h3 တန်ဖိုးနှင့်တူညီသည်။ Throttling လုပ်ခြင်းကြောင့် enthalpy တန်ဖိုးများ မပြောင်းလဲသွားပေ။

$$h4 \cong h3\ \text{(throttling)} \rightarrow h4 = 95.47\ \text{kJ/kg}$$

(က) Refrigerated space မှ အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal - $\dot{Q}_L$)နှင့် compressor အတွက် လိုအပ်သည့် power input ($\dot{W}_{in}$)ကို အောက်ပါအတိုင်း တွက်ယူနိုင်သည်။

Refrigerated space မှ အပူဖယ်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal - $\dot{Q}_L$)

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) = (0.05\ kg/s)\,[(239.16 - 95.47)\ kJ/kg] = 7.18\ kW$$

Power input ($\dot{W}_{in}$)

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1) = (0.05\ kg/s)\,[(275.39 - 239.16)\ kJ/kg] = 1.81\ kW$$

(ခ) Refrigerant မှ ပြင်ပ(environment)သို့ စွန့်ထုတ်လိုက်သည့် အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat rejection)

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3) = (0.05\ kg/s)\,[(275.39 - 95.47)\ kJ/kg] = 9.0\ kW$$

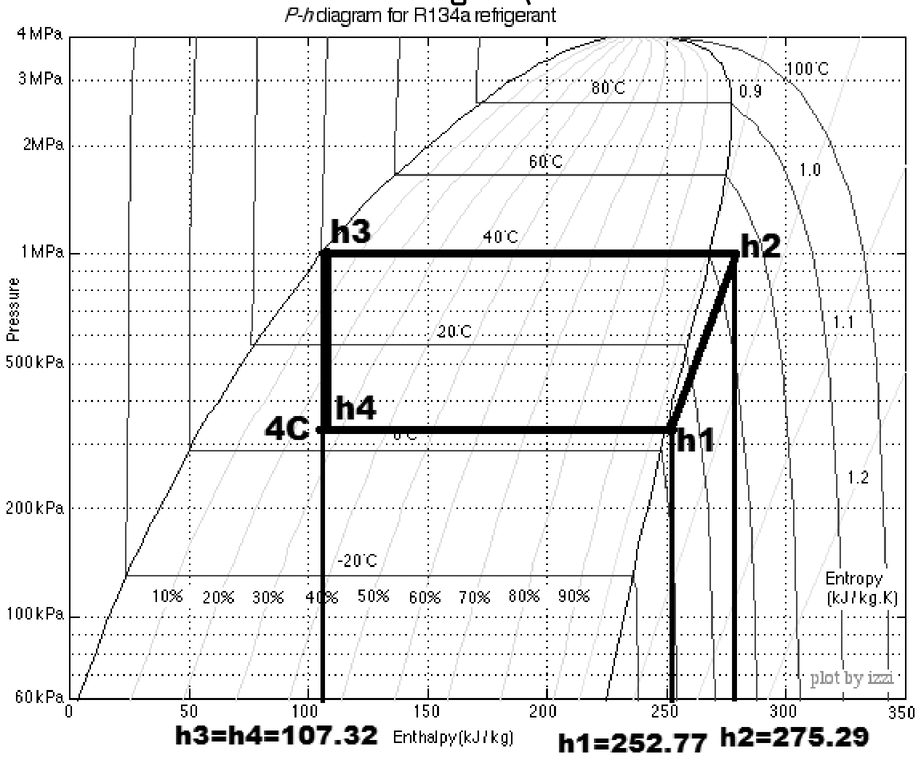
Energy balance equation မှ တွက်ယူနိုင်သည်။

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L - \dot{W}_{in} = 7.18 + 1.81 = 8.99\ kW$$

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{7.18\ kW}{1.81\ kW} = 3.97$$

Refrigerator သည် အပူစွမ်းအင်(thermal energy) (၄)ယူနစ်ခန့်ကို refrigerated space မှ ဖယ်ထုတ်ပစ်ရန် အတွက် လျှပ်စစ်ဓာတ်အား(electric energy) (၁)ယူနစ်ကို အသုံးပြုသည်။

၃.၃.၅ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ(၃)



ပုံ ၃-၉(ဂ) ဥပမာတွင် ဖော်ပြထားသည့် ideal vapor compression refrigeration cycle ၏ T-s diagram

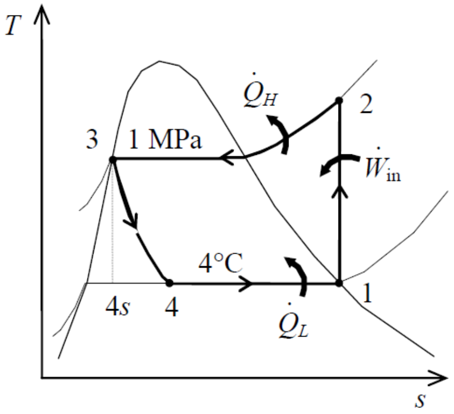
Ideal vapor compression refrigeration cycle တစ်ခုတွင် refrigerant R-134a ကို working fluid အဖြစ် အသုံးပြုထားသည်။ COP နှင့် power requirement တို့ကိုရှာပါ။

အဖြေ-

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။



ပုံ ၃-၁၀

Ideal vapor compression refrigeration cycle တွင် compression process သည် isentropic ဖြစ်သည်။ Refrigerant များ compressor အတွင်းသို့ evaporator ဖိအား(pressure) အောက်တွင် saturated vapor အဖြစ် ဝင်ရောက်လာသည်။ Condenser မှ condenser ဖိအား(pressure) အောက်တွင် saturated liquid အဖြစ် ထွက်သွားသည်။ (စာမျက်နှာ 2-30 နောက်ပိုင်းမှ table A-11 ၊ A-12 နှင့် A-13)

State 1

State 1 သည် saturated liquid လိုင်းပေါ်တွင် တည်ရှိသောကြောင့် saturated refrigerant- R134a temperature table(စာမျက်နှာ 2-30 နှင့် 2-31 မှ table A-11)မှ ဖတ်ယူရသည်။ အဘယ်ကြောင့်ဆိုသော် ပုစ္ဆာတွင် temperature (4°C) ပေးထားသောကြောင့်ဖြစ်သည်။ စာမျက်နှာ 2-30 နှင့် 2-31 မှ table A-11 ၌ temperature (4°C)အတန်းနှင့် saturated vapor h_g colum တို့ ဆုံသည့်နေရာမှ ဖတ်ယူလျှင် 252.77 kJ/kg ရသည်။ State 1 ၌ အပူချိန် 4°C သည် saturated vapor အခြေအနေ ဖြစ်သည်။

$$\left.\begin{array}{l} T_1 = 4°\text{C} \\ \text{sat. vapor} \end{array}\right\} \begin{array}{l} h_1 = h_{g\,@\,4°\text{C}} = 252.77\ \text{kJ/kg} \\ s_1 = s_{g\,@\,4°\text{C}} = 0.92927\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K} \end{array}$$

State 2

State 2 သည် superheated region နေရာတွင် ရောက်ရှိနေသောကြောင့် superheated refrigerant-134a ဇယား(စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13)မှ ဖတ်ယူရသည်။ Table A-13 ဖတ်ရာတွင် သက်ဆိုင်သည့် ဖိအားကို ပထမဦးစွာ ရွေးချယ်ရသည်။ ဤဉပမာ အရ P2 တန်ဖိုးသည် 1.0 MPa ဖြစ်သောကြောင့် 1.0 MPa ဇယားငယ် နေရာမှ ဖတ်ယူရသည်။ စာမျက်နှာ 2-34 အလယ်နေရာတွင် 1.0 MPa ဇယားငယ် ရှိသည်။ S2 နှင့် S1 တူညီသည်။ တစ်နည်းအားဖြင့် entropy generation မဖြစ်ပေါ်ပေ။ 1.0 MPa ဇယားငယ်မှ S တန်ဖိုး 0.92927 မှ h2 တန်ဖိုးကို ဖတ်ယူရသည်။ h2 တန်ဖိုးကို တိုက်ရိုက် ဖတ်ယူရန် မဖြစ်နိုင်သောကြောင့် S=0.9525 kJ/kg K လိုင်းမှ h တန်ဖိုးကို ဖတ်၍ တွက်ယူရခြင်း ဖြစ်သည်။

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = 1\ \text{MPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}\right\} h_2 = 275.29\ \text{kJ/kg}$$

State 3

State 3 သည် saturated liquid လိုင်းပေါ်တွင် တည်ရှိသောကြောင့် saturated refrigerant- 134a- Pressure table (စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12)မှ ဖတ်ယူရသည်။ စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12 ၌ pressure 1000 kPa အတန်းနှင့် saturated vapor h_f colum တို့ ဆုံသည့်နေရာမှ ဖတ်ယူလျှင်107.32 kJ/kg ရသည်။

$$\left.\begin{array}{l} P_3 = 1\ \text{MPa} \\ \text{sat. liquid} \end{array}\right\} h_3 = h_{f\,@\,1\,\text{MPa}} = 107.32\ \text{kJ/kg}$$

State 4

h4 တန်ဖိုးသည် နှင့် h3 တန်ဖိုးနှင့်တူညီသည်။ Throttling လုပ်ခြင်းကြောင့် enthalpy တန်ဖိုးများ မပြောင်းလဲသွားပေ။

$$h_4 \cong h_3 = 107.32\ \text{kJ/kg} \quad (\text{throttling})$$

Refrigerant ၏ mass flow rate

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}_R\,(h_2 - h_1) - \dot{Q}_{in}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\,(h_1 - h_4) \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}_L}{(h_1 - h_4)} = \frac{400\ kJ/s}{(252.77 - 107.32)\ kJ/kg} = 2.750\ kg/s$$

Power requirement သည်

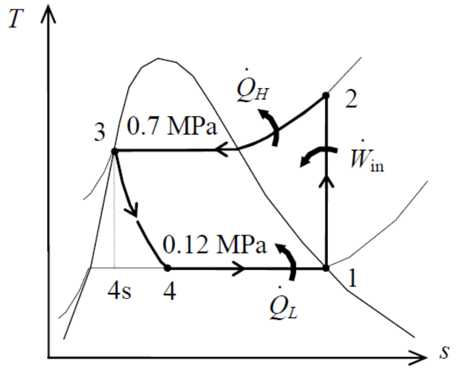
$$\dot{W}_{in} = \dot{m}\,(h_2 - h_1) = (2.750\ \text{kg/s})(275.29 - 252.77)\ \text{kJ/kg} = 61.93\ \text{kW}$$

Refrigerator ၏ COP သည်

$$COP_{Max} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{400\ \text{kW}}{61.93\ \text{kW}} = 6.46$$

အထက်ပါ ဉပမာမှ condenser pressure ကို 0.9 MPa ပြောင်း၍ လေ့ကျင့်ခန်းအဖြစ် တွက်ပါ။

၃.၃.၆ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ(၄)



ပုံ ၃-၁၁

အထက်ပါ ဥပမာမှ throttling valve နေရာတွင် isentropic turbine ဖြင့် ပြောင်းလဲတပ်ဆင်လိုက်လျှင် ပိုကောင်းလာမည့် COP (percentage) နှင့် refrigerated space မှ အပူ စွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal) ကို ရှာပါ။

Answers: 4.2 percent, 4.2 percent

အဖြေ- Ideal vapor compression refrigeration cycle တစ်ခုတွင် refrigerant R-134a ကို working fluid အဖြစ် အသုံးပြုထားသည်။ Throttling valve နေရာတွင် isentropic turbine ဖြင့် ပြောင်းလဲ တပ်ဆင်သည်။

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

Throttling valve နေရာတွင် isentropic turbine ဖြင့် ပြောင်းလဲ တပ်ဆင်သည့်အခါ

s4s = s3 = sf @ 0.7 MPa = 0.33230 kJ/kg·K

Turbine အထွက်အခြေအနေ(exit)တွင် ရှိမည့် enthalpy တန်ဖိုးသည်

$$x_{4s} = \left(\frac{s_3 - s_f}{s_{fg}}\right)_{@\ 120\ \text{kPa}} = \frac{0.33230 - 0.09275}{0.85503} = 0.2802$$

$$h_{4s} = \left(h_f + x_{4s} h_{fg}\right)_{@\ 120\ \text{kPa}} = 22.49 + (0.2802)(214.48) = 82.58\ \text{kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\,(h_1 - h_{4s}) = (0.05\ \text{kg/s})(236.97 - 82.58)\ \text{kJ/kg} = 7.72\ \text{kW}$$

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{7.72\ \text{kW}}{1.83\ \text{kW}} = 4.23$$

$\dot{Q}_L$ နှင့် COP တို့တွင် ပိုကောင်းလာသည့် ရာခိုင်နှုန်း(percentage) ကို တွက်ယူသည်။

$\dot{Q}_L$ ပိုများလာသည့် ရာခိုင်နှုန်း(percentage)

$$\dot{Q}_L = \frac{\Delta\dot{Q}_L}{\dot{Q}_L} = \frac{7.72 - 7.41}{7.41} = 4.2\%$$

COP_R ပိုကောင်းလာသည့် ရာခိုင်နှုန်း(percentage)

$$COP_R = \frac{\Delta COP_R}{COP_R} = \frac{4.23 - 4.06}{4.06} = 4.2\%$$

၃.၃.၇ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ (၅)

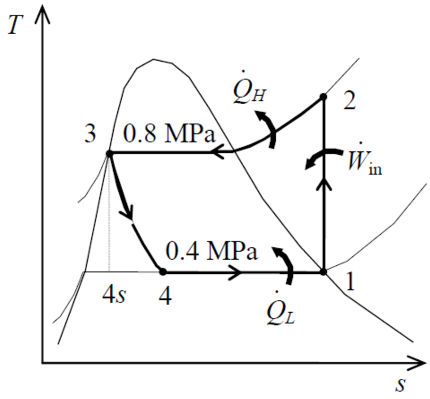
Ideal vapor compression refrigeration cycle တစ်ခုတွင် refrigerant-134a ကို working fluid အဖြစ် အသုံးပြု ထားသည်။ Refrigerant ၏ mass flow rate နှင့် power requirement များကို တွက်ပါ။

အဖြေ-

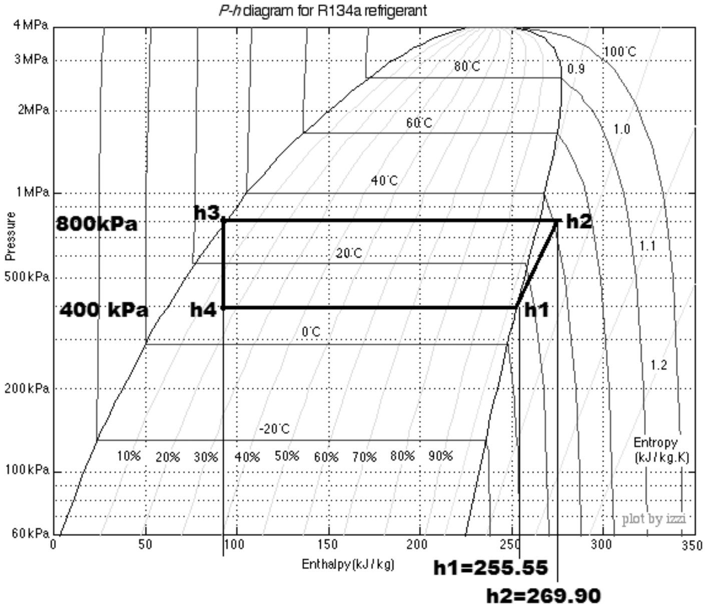
ယူဆချက်(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှု များကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။



ပုံ ၃-၁၂(က)



ပုံ ၃-၁၂(ခ)

Ideal vapor compression refrigeration cycle တစ်ခုတွင် compression process သည် isentropic ဖြစ်သည်။ Compressor အတွင်းသို့ refrigerant များ evaporator pressure အောက်တွင် saturated vapor အဖြစ် ဝင်ရောက်လာသည်။ Condenser အတွင်းမှ condenser pressure အောက်တွင် saturated liquid အဖြစ် ထွက်သွားသည်။ Refrigerant table များ(စာမျက်နှာ 2-30 နောက်ပိုင်းမှ table A-11 ၊ A-12 နှင့် A-13)မှ တန်ဖိုးများကို ဖတ်ယူပါ။

State 1

State 1 သည် saturated liquid လိုင်းပေါ်တွင် တည်ရှိသောကြောင့် saturated refrigerant- R134a pressure table (စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12)မှ ဖတ်ယူရသည်။ အဘယ်ကြောင့်ဆိုသော် ပုစ္ဆာတွင် pressure တန်ဖိုး(400 kPa) ပေးထားသောကြောင့် ဖြစ်သည်။ စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12 ၌ pressure 400 kPa အတန်းနှင့် saturated vapor h_g colum တို့ ဆုံသည့်နေရာမှ ဖတ်ယူလျှင် 255.55 kJ/kg ရသည်။

$$\left.\begin{array}{l} P_1 = 400\,\text{kPa} \\ \text{sat. vapor} \end{array}\right\} \begin{array}{l} h_1 = h_{g\,@\,400\,\text{kPa}} = 255.55\,\text{kJ/kg} \\ s_1 = s_{g\,@\,400\,\text{kPa}} = 0.92691\,\text{kJ/kg}\cdot\text{K} \end{array}$$

State 2

State 2 သည် superheated region နေရာတွင် ရောက်ရှိနေသောကြောင့် superheated refrigerant-R134a ဇယား(စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13)မှ ဖတ်ယူရသည်။ Table A-13 ဖတ်ရာတွင် သက်ဆိုင်သည့် ဖိအားကို ပထမဦးစွာ ရွေးချယ်ရသည်။ ဤဥပမာအရ P2 တန်ဖိုးသည် 0.8 MPa ဖြစ်သောကြောင့် 0.8 MPa ဇယားငယ်နေရာမှ ဖတ်ယူရသည်။ စာမျက်နှာ 2-34 အလယ်နေရာတွင် 0.8 MPa ဇယားငယ် ရှိသည်။ S2 နှင့် S1 တူညီသည်။ တစ်နည်းအားဖြင့် entropy generation မဖြစ်ပေါ်ပေ။ 0.8 MPa ဇယားငယ်မှ S တန်ဖိုး 0.92691 kJ/kg K မှ h2 တန်ဖိုးကို ဖတ်ယူရသည်။ h2 တန်ဖိုးကို တိုက်ရိုက် ဖတ်ယူရန် မဖြစ်နိုင်သောကြောင့် S=0.9480 kJ/kg K လိုင်းမှ h တန်ဖိုးကို ဖတ်၍ တွက်ယူရခြင်း ဖြစ်သည်။

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = 800\,\text{kPa} \\ s_2 = s_1 \end{array}\right\} h_2 = 269.90\,\text{kJ/kg}$$

State 3

State 3 သည် saturated liquid လိုင်းပေါ်တွင် တည်ရှိသောကြောင့် saturated refrigerant- R134a-pressure table (စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12) မှ ဖတ်ယူရသည်။ စာမျက်နှာ 2-32 မှ table A-12 ၌ pressure 800 kPa အတန်းနှင့် saturated vapor h_f colum တို့ ဆုံသည့်နေရာမှ ဖတ်ယူလျှင် 95.47 kJ/kg ရသည်။

$$\left.\begin{array}{l} P_3 = 800\,\text{kPa} \\ \text{sat. liquid} \end{array}\right\} h_3 = h_{f\,@\,800\,\text{kPa}} = 95.47\,\text{kJ/kg}$$

State 4

h4 တန်ဖိုးသည် နှင့် h3 တန်ဖိုးနှင့်တူညီသည်။ Throttling လုပ်ခြင်းကြောင့် enthalpy တန်ဖိုးများ မပြောင်းလဲသွားပေ။

$$h_4 \cong h_3 = 95.47\,\text{kJ/kg} \quad \text{(throttling)}$$

Refrigerant ၏ mass flow rate သည်

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\,(h_1 - h_4) \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}_L}{(h_1 - h_4)} = \frac{10\ \text{kJ/s}}{(255.55 - 95.47)\ \text{kJ/kg}} = 0.06247\ \text{kg/s}$$

Power requirement သည်

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}\,(h_2 - h_1) = (0.06247\ \text{kg/s})(269.90 - 255.55)\ \text{kJ/kg} = 0.8964\ \text{kW}$$

၃.၃.၈ Ideal Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ (၆)

Refrigerator တစ်လုံးတွင် refrigerant-134a ကို working fluid အဖြစ် အသုံးပြုထားသည်။ Ideal vapor compression refrigeration cycle အဖြစ်သတ်မှတ်၍

(က) refrigerant ၏ mass flow rate

(ခ) condenser pressure နှင့်

(ဂ) refrigerator ၏ COP တို့ကို ရှာပါ။

အဖြေ-

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

(က)Refrigerant table များမှ တန်ဖိုးများကို ဖတ်ယူပါ။

$$\left.\begin{aligned}P_4 &= 120\text{ kPa}\\ x_4 &= 0.30\end{aligned}\right\} h_4 = 86.83\text{ kJ/kg}$$

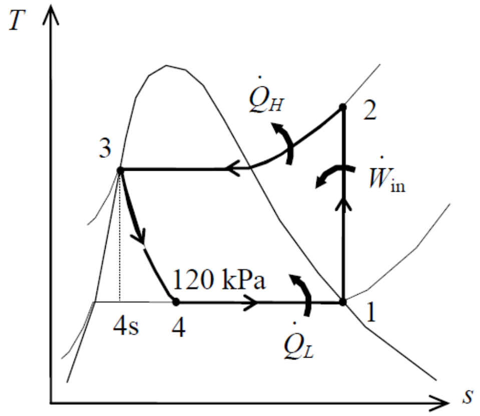
$$h_3 = h_4$$

$$\left.\begin{aligned}h_3 &= 86.83\text{ kJ/kg}\\ x_3 &= 0\text{ (sat. liq.)}\end{aligned}\right\} P_3 = \mathbf{671.8\ kPa}$$

$$P_2 = P_3$$

$$\left.\begin{aligned}P_2 &= 671.8\text{ kPa}\\ T_2 &= 60°\text{C}\end{aligned}\right\} h_2 = 298.87\text{ kJ/kg}$$

$$\left.\begin{aligned}P_1 = P_4 &= 120\text{ kPa}\\ x_1 &= 1\text{ (sat. vap.)}\end{aligned}\right\} h_1 = 236.97\text{ kJ/kg}$$



ပုံ ၃-၁၃

Refrigerant ၏ mass flow rate သည်

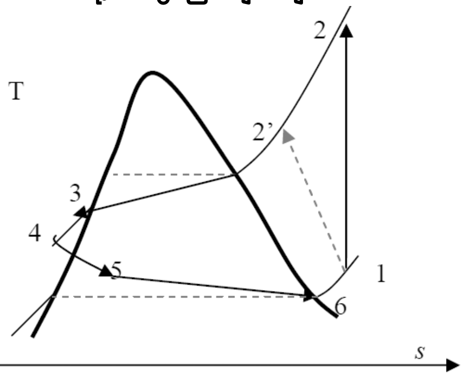
$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{in}}{h_2 - h_1} = \frac{0.45\text{ kW}}{(298.87\ 236.97)\text{kJ/kg}} = 0.00727\text{ kg/s}$$

(ဂ) Refrigeration load နှင့် COP သည်

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\,(h_1 - h_4) = (0.0727\text{ kg/s})(236.97\ 86.83)\text{kJ/kg} = 1.091\text{kW}$$

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{1.091\text{kW}}{0.45\text{ kW}} = 2.43$$

၃.၄ Ideal Cycles နှင့် Actual Cycles တို့၏ ကွာခြားချက်များ



ပုံ ၃-၁၄ Actual vapor compression cycle တစ်ခု၏ T-s diagram

Ideal cycle နှင့် actual cycle တို့ ခြားနားချက်များမှာ component များ၌ ဖြစ်ပေါ်သည့် irreversibility ကြောင့် ဖြစ်သည်။

(၁) Ideal cycle တွင် refrigerant များသည် compressor အတွင်းသို့ saturated vapor အနေဖြင့် ဝင်ရောက်လာသည်ဟု ယူဆထားသော်လည်း လက်တွေ့ အခြေအနေတွင် refrigerant များသည် compressor အတွင်းသို့ superheated vapor အဖြစ် ဝင်ရောက်လာကြသည်။

(၂) Evaporator နှင့် compressor ကို ဆက်ထားသည့် ပိုက်ကို suction line ဟုခေါ်သည်။ Suction line ရှည်လွန်းသည့်အခါ ဖိအားကျဆင်းမှု(pressure drop)နှင့် အနီးဝန်းကျင်သို့ အပူစီးကူးမှု(heat transfer) ပိုမိုများလာနိုင်သည်။ Ideal cycle တွင် ထိုအရာများ မဖြစ်ပေါ်ဟု ယူဆထားသည်။ ပုံ(၃-၁၄)မှ process 6-1 ရည်ညွှန်းသည်။ လက်တွေ့မောင်းနေချိန်တွင် ဖိအားကျဆင်းမှု(pressure drop) ဖြစ်ပေါ်သည်။

(၃) Compressor များသည် လက်တွေ့ အခြေအနေတွင် internally reversible မဖြစ်နိုင်သောကြောင့် entropy ပိုများလာနိုင်သည်။ Entropy generation ဖြစ်သည်ဟု ပြောဆိုလေ့ရှိသည်။ သို့သော် multi-stage compressor များတွင် intercooler တပ်ဆင်ထားခြင်း သို့မဟုတ် refrigerant ဖြင့် အေးအောင် ပြုလုပ်ခြင်း ဖြင့်လည်း entropy မများအောင် ပြုလုပ် နိုင်သည်။ ပုံ(၃-၁၄)တွင် state 2'နေရာကို ရည်ညွှန်းသည်။

(၄) လက်တွေ့အခြေအနေတွင် refrigerant များသည် condenser မှ sub-cooled liquid အခြေအနေဖြင့် ထွက်သွားသည်။ ပုံ(၃-၁၄)တွင် point 3 မှ point 4 သည် sub-cooling process ဖြစ်သည်။ Sub-cooling ဖြစ်ခြင်းကြောင့် cooling capacity ပိုများလာနိုင်ပြီး expansion valve အတွင်းသို့ vapor (bubbles) အနေဖြင့် ဝင်ရောက်ခြင်းမှ ကာကွယ်ပေးသည်။

(၅) Condenser အတွင်း၌ အပူစွန့်ထုတ်ခြင်း(heat rejection) နှင့် evaporator အတွင်း၌ အပူ စုပ်ယူခြင်း(heat addition)တို့ ဖြစ်နေစဉ် refrigerant ၏ ဖိအား ပြောင်းလဲနေသည်။ Ideal cycle တွင် ပုံသေ ဖိအား (constant pressure)၌ အပူစွန့်ထုတ်ခြင်း (heat rejection)နှင့် အပူစုပ်ယူခြင်း(heat addition) ဖြစ်ပေါ် သည်ဟု ယူဆထားသည်။

၃.၅ Practical Considerations and COP

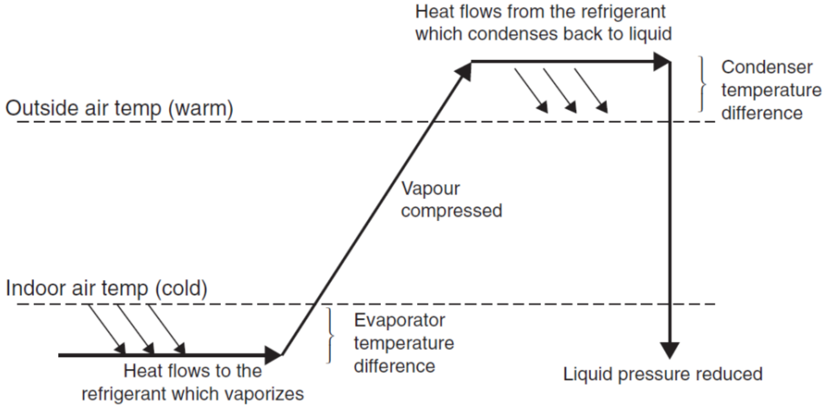
Refrigerant R134a ကို အသုံးပြုထားသည့် simple circuit တစ်ခုကို ပုံ(၃-၆)တွင် ဖော်ပြထားသည်။

ပုံ(၃-၆)မှ အပူချိန် 5°C တွင် evaporation ဖြစ်ပြီး 35°C တွင် condensation ဖြစ်သည်။ Pressure နှင့် enthalpy တို့ကို အောက်တွင် ဖော်ပြထားသည်။

Enthalpy of fluid entering evaporator	=	249.7 kJ/kg
Enthalpy of saturated vapor leaving evaporator	=	395.6 kJ/kg
Cooling effect = 395.6 - 249.7	=	145.9 kJ/kg
Enthalpy of superheated vapor leaving compressor (isentropic compression)	=	422.5

Vapor compression cycle သည် စက်မှုစွမ်းအင်(mechanical energy)ကို အသုံးပြု၍ အပူစွမ်းအင်(heat energy)ကို ဖယ်ထုတ်ခြင်း ဖြစ်သည်။ ထိုစွမ်းအင် နှစ်မျိုး၏ ပမာဏမှတစ်ဆင့် system ၏ စွမ်းဆောင်ရည် (performance)ကို တွက်ယူနိုင်သည်။

> Ideal သို့မဟုတ် theoretical vapor compression cycle ၏ Coefficient Of Performance (COP)သည် Carnot cyle ၏ Coefficient Of Performance(COP)ထက် နည်းသည်။ Ideal vapor compression cycle COP သည် အသုံးပြုထားသည့် refrigerant ၏ ဂုဏ်သတ္တိများ အပေါ်တွင် မူတည်သည်။



ပုံ ၃-၁၅ Evaporator နှင့် condenser တို့၌ အပူစီးကူးမှု ဖြစ်ပေါ်စေရန်အတွက် အပူချိန်ကွာခြားချက် (temperature difference) လိုအပ်ပုံကို ဖော်ပြထားသည်။

> Heat exchanger အရွယ်အစားကြီးလေ အပူချိန် ခြားနားချက်(temperature difference) နည်းလေ ဖြစ်သည်။ Refrigerant အပူချိန် နှင့် medium အပူချိန်ခြားနားချက် အနည်းငယ်သာ ဖြစ်ရန် လိုအပ်သည်။ Cycle ၏ COP သည် condenser နှင့် evaporator အပူချိန် ခြားနားချက်(temperature difference) အပေါ်တွင် မူတည်၏။ (see Table 3-2).

Table 3-2 တွင် cycle ၏ temperature lift မြင့်တက်လာခြင်းကြောင့် heat exchanger အပူချိန် ခြားနားချက်(temperature difference)ပိုများကာ Carnot COP ကျဆင်းသွားပုံကို ဖော်ပြထားသည်။

Table 3-2 COP values at 5°C, with an outside air temperature of 35°C (refrigerant R404A)

Δ T at evaporator and condenser (K)	0	5	10
Evaporating temperature (°C)	-5	-10	-15
Condensing temperature (°C)	35	40	45
Temperature lift (K)	40	50	60
Evaporating pressure (bar absolute)	5.14	4.34	3.64
Condensing pressure (bar absolute)	16.08	18.17	20.47
Pressure ratio	3.13	4.19	5.62
Carnot COP (refrigeration cycle)	6.70	5.26	4.30
COP, ideal vapor compression cycle [1]	4.96	3.56	2.62
COP with 70% efficient compression [2]	3.47	2.49	1.83
System efficiency index, SEI [3]	0.518	0.372	0.273

Note 1: The ideal vapor compression cycle with constant enthalpy expansion and isentropic adiabatic compression with refrigerant R404A.

Note 2: The vapor compression cycle as above and with 70% efficient compression with R404A and no other losses.

Note 3: SEI is the ratio between the actual COP and the Carnot COP with reference to the cooling load and outside air temperatures, i.e. when the heat exchanger temperature differences, ΔT, are zero. SEI decreases as ΔT increases due to less effective heat exchangers. Values are shown for the cycle with 70% efficient compression. Actual values will tend to be lower due to pressure drops and other losses.

Heat exchanger ၏ အရွယ်အစား(size)ကြောင့် လက်တွေ့ အခြေအနေတွင် အကျိုးသက်ရောက်မှုများ ရှိနိုင်သည်။
Evaporator အရွယ်အစား ကြီးမားလာခြင်းကြောင့် အောက်ပါ အကျိုးကျေးဇူးများ ရရှိနိုင်သည်။

(၁) Suction pressure မြင့်တက်လာပြီး သိပ်သည်းဆများခြင်းကြောင့် gas များ compressor အတွင်းသို့ ပိုဝင်ရောက်သည်။ Swept volume တူညီသော်လည်း ပိုများသည့် mass များ ဝင်ရောက်လာခြင်းကြောင့် refrigeration effect ပိုများလာသည်။

(၂) Suction pressure မြင့်မားသောကြောင့် compression ratio နည်းသွားသည်။ စွမ်းအင်သုံးစွဲမှု နည်းသည်။

Condenser အရွယ်အစား ကြီးမားလာခြင်းကြောင့် အောက်ပါ အကျိုးကျေးဇူးများ ရရှိနိုင်သည်။

(၁) Condensing temperature ကျဆင်းပြီး colder liquid များ expansion valve အတွင်းသို့ ဝင်ရောက်သောကြောင့် cooling effect ပိုများလာသည်။

(၂) Discharge pressure နိမ့်သောကြောင့် compression ratio နည်းသွားသည်။ စွမ်းအင်သုံးစွဲမှုနည်းသည်။

ဥပမာ-

Refrigerant R134a ကို အသုံးပြုထားသည့် refrigeration cycle တစ်ခုသည် အခန်း တစ်ခုကို အပူချိန် 0°C တွင် ထိန်းထားရန် လိုအပ်ပြီး ပြင်ပအချိန် 30°C ရှိသည့်နေရာသို့ အပူများကို စွန့်ထုတ်ပစ်ရန် ဒီဇိုင်း လုပ်ထားသည်။ Evaporator နှင့် condenser တို့ ၏ အပူချိန် ခြားနားချက်(temperature difference)သည် 5 K ဖြစ်သည်။ Refrigeration cycle ၏ Carnot COP နှင့် R134a အသုံးပြုထားသည့် ideal vapor compression cycle COP ကို ရှာပါ။

အဖြေ - Carnot COP for 0°C (273 K) to 30°C (303 K)

$$\boldsymbol{Carnot\ COP} = \frac{\mathbf{273}}{(\mathbf{303-273})} = \mathbf{9.1}$$

Evaporator နှင့် condenser တို့၏ အပူချိန်ခြားနားချက်(temperature difference)သည် 5K ဖြစ်သော ကြောင့် refrigeration cycle ၏ evaporating အပူချိန်သည် 5°C ဖြစ်သည်။ Condensing အပူချိန်သည် 35°C ဖြစ်သည်။ အခန်းအပူချိန် 0°C မှ အပူများကိုစုပ်ယူရန် chiller ၏ evaporator အတွင်းရှိ refrigerant ၏ အပူချိန်သည် -5°C ဖြစ်ရမည်။ ပြင်ပအပူချိန် 30°C သို့ အပူများကို စွန့်ထုတ်ရန်အတွက် chiller ၏ condenser အတွင်းရှိ refrigerant ၏ အပူချိန်သည် 35°C ဖြစ်ရမည်။ အဘယ်ကြောင့်ဆိုသော် evaporator နှင့် condenser တို့၏ အပူချိန် ခြားနားချက်သည် 5K ဖြစ်သောကြောင့် ဖြစ်သည်။

Refrigeration cycle ၏ evaporating အပူချိန်သည် –5°C ဖြစ်ပြီး condensing အပူချိန်သည် 35°C ဖြစ်လျှင် Carnot COP ကို ရှာပါ။

$$\boldsymbol{Carnot\ COP} = \frac{\mathbf{268}}{(\mathbf{303-268})} = \mathbf{6.7}$$

R-134a အတွက် (စာမျက်နှာ 3-18 မှ)

Cooling effect = 395.6 - 249.7 = 145.9 kJ/kg

Compressor energy input = 422.5 - 395.6 = 26.9 kJ/kg.

Ideal R134a vapor compression cycle COP

$$\boldsymbol{Ideal\ R134a\ vapor\ compression\ cycle\ COP} = \frac{\boldsymbol{Cooling\ Effect\ (Q)}}{\boldsymbol{Compressor\ Energy\ Input\ (W_{input})}}$$

$$= \frac{\mathbf{145.9}\ \boldsymbol{kJ/kg}}{\mathbf{26.9}\ \boldsymbol{kJ/kg}} = \mathbf{6.7}$$

Mechanical နှင့် thermal loss များကြောင့် actual cycle COP သည် 6.7 ထက် ပိုညံ့ဖျင်းနိုင်သည်။ COP သည် cooling effect နှင့် compressor input power တို့၏ အချိုးဖြစ်သည်။ Vapor compression cycle များ ဒီဇိုင်း လုပ်ရန် နှင့် အမှားရှာဖွေရန်အတွက် P–h သို့မဟုတ် Mollier diagram ကို အသေးစိတ် စနစ်တကျ နားလည်ရန် လိုအပ်သည်။

၃.၆ Refrigeration and Heat Pumps

ပုံ(၃-၁၆)တွင် ဖော်ပြထားသည့် အိမ်သုံး ရေခဲသေတ္တာမှ freezer compartment အတွင်းရှိ tube များသည် ရေခဲ သေတ္တာအတွင်းမှ အပူများကို စုပ်ယူပြီး evaporator အဖြစ် ဆောင်ရွက် ပေးသည်။ ရေခဲသေတ္တာ နောက်၌ ရှိနေသည့် coil သည် အပူများကို စွန့်ထုတ်သည့် condenser အဖြစ် ဆောင်ရွက်ပေးသည်။

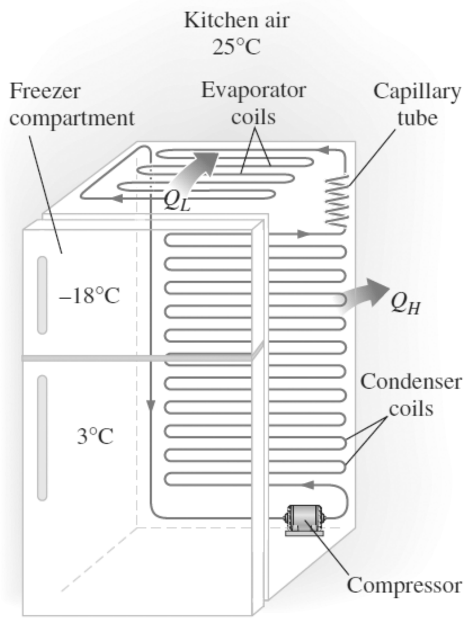
$$(\boldsymbol{q_{in}} - \boldsymbol{q_{out}}) = (\boldsymbol{w_{in}} - \boldsymbol{w_{in}}) = \boldsymbol{h_e} - \boldsymbol{h_i}$$

$$\boldsymbol{COP_R} = \frac{\boldsymbol{q_L}}{\boldsymbol{W_{net\ in}}} = \frac{\boldsymbol{h_1} - \boldsymbol{h_4}}{\boldsymbol{h_2} - \boldsymbol{h_1}}$$

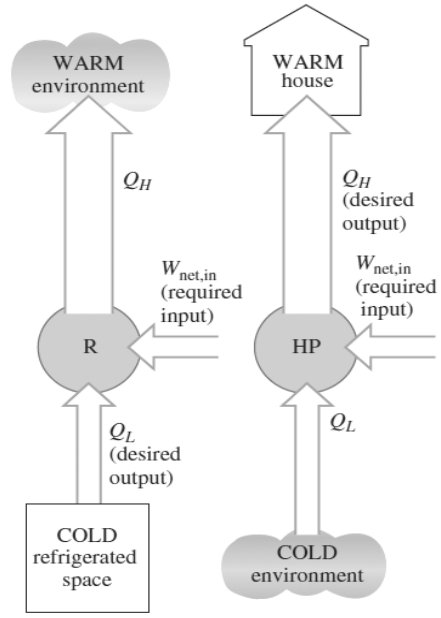
$$COP_{HP} = \frac{q_H}{W_{net\ in}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

where $h_2 = h_{g\,@\,P1}$ and $h_3 = h_{f\,@\,P3}$ for the ideal case.

Q_L သည် အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာ(T_L)မှ စုပ်ယူလိုက်သည့် အပူပမာဏ ဖြစ်သည်။
Q_H သည် အပူချိန်မြင့်သည့်နေရာ(T_H)သို့ စွန့်ထုတ်ပစ်လိုက်သည့် အပူပမာဏ ဖြစ်သည်။
W_{net} သည် refrigerator သို့ ထည့်ပေးရမည့် net work input ဖြစ်သည်။



ပုံ ၃-၁၆ အိမ်သုံး ရေခဲသေတ္တာ (household refrigerator) တစ်လုံးပုံ



ပုံ ၃-၁၇ (a)Refrigerator (b) Heat pump

အပူချိန်မြင့်သည့်နေရာမှ အပူ(heat)သည် အပူချိန်နိမ့်သည့် နေရာသို့ သဘာဝအတိုင်း အလိုအလျောက် စီးဆင်းနိုင်သည်။ သို့သော် အပူချိန် နိမ့်သည့်နေရာ အပူ(heat)သည် အပူချိန် မြင့်သည့် နေရာသို့ အလိုအလျောက် စီးဆင်းရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။

အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာမှ အပူ(heat)များသည် အပူချိန် မြင့်သည့် နေရာသို့ အပူ(heat)များ ကူးပြောင်း (transfer) သွားအောင် ပြုလုပ်ပေးသည့် ကိရိယာများ(devices)ကို refrigerator သို့မဟုတ် refrigeration machine ဟု ခေါ်သည်။

Refrigerator တစ်လုံးကို ပုံ(၃-၁၆) နှင့် ပုံ(၃-၁၇a)တွင် ဖော်ပြထားသည်။ T_L သည် အပူချိန် နိမ့်သည့်နေရာ (အေးသည့်နေရာ)၏ အပူချိန် ဖြစ်သည်။ T_H သည် ပူသည့် နေရာ(အပူချိန်မြင့်သည့်နေရာ)၏ အပူချိန် ဖြစ်သည်။

အပူချိန်နိမ့်သည့်နေရာမှ အပူ(heat)များ အပူချိန်မြင့်သည့်နေရာသို့ ကူးပြောင်း(transfer)သွားအောင် ပြုလုပ်ပေးသည့် ကိရိယာများ(devices)ကို heat pump ဟု ခေါ်သည်။ Device တစ်မျိုးတည်းသာဖြစ်ပြီး အသုံးပြုပုံ မူတည်၍ refrigerator နှင့် heat pump ကွဲပြားခြင်းဖြစ်သည်။

Refrigerator နှင့် heat pump တို့၏ performance ကို Coefficient of Performance (COP)ဖြင့် ဖော်ပြသည်။

$$COP_R = \frac{Desired\ output}{Required\ input} = \frac{Cooling\ effect}{Work\ input} = \frac{Q_L}{W_{net\ input}}$$

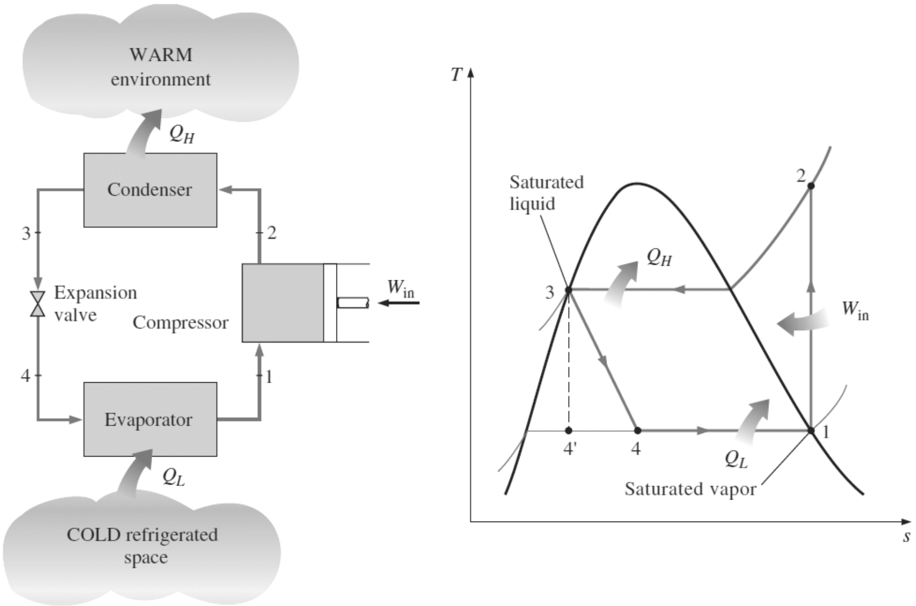
$$COP_{HP} = \frac{Desired\ output}{Required\ input} = \frac{Heating\ effect}{Work\ input} = \frac{Q_H}{W_{net\ in}}$$

$$COP_{HP} = COP_R + 1$$

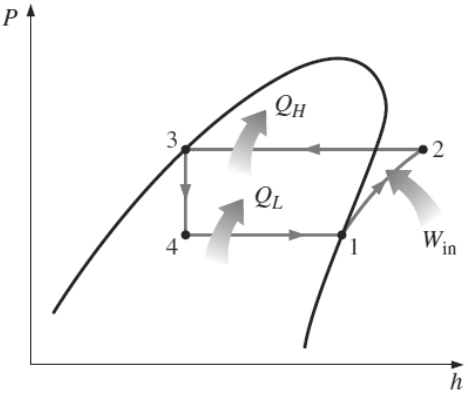
COP_R နှင့် COP_{HP} တို့သည် (၁)ထက် ပိုများသည့် တန်ဖိုးများ ဖြစ်ကြသည်။

Refrigeration system တစ်ခု၏ cooling capacity သည် အပူချိန်နိမ့်သည့် နေရာ(refrigerated space)မှ အပူကိုဖယ်ထုတ်နိုင်သည့်နှုန်း(rate of heat removal) ဖြစ်ပြီး tons of refrigeration ဖြင့် ဖော်ပြလေ့ရှိသည်။

One ton of refrigeration ဆိုသည်မှာ အပူချိန် 0°C(32°F)တွင် ရေခဲတစ်တန်ကို အပူချိန် 0°C ရေ(liquid water)ကို အဖြစ်သို့ (၂၄)နာရီအတွင်း ရောက်အောင် ဖယ်ထုတ်ပေးရန် လိုအပ်သော အပူပမာဏဖြစ်သည်။ One ton of refrigeration သည် 211 kJ/min၊ 12,000 Btu/hr သို့မဟုတ် 200 Btu/min နှင့် ညီမျှသည်။



ပုံ ၃-၁၈ Schematic and T-s diagram for the ideal vapor compression refrigeration cycle.



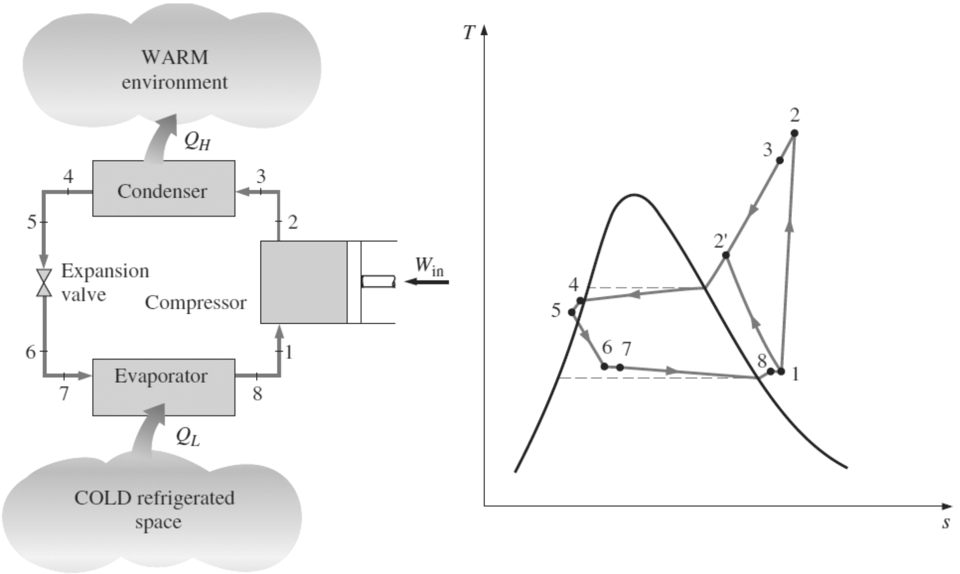
ပုံ ၃-၁၉ The P-h diagram of an ideal vapor compression refrigeration cycle.

၃.၇ Actual Vapor Compression Refrigeration Cycle

Actual vapor compression refrigeration cycle တွင် ideal cycle နှင့် မတူညီသည့် ကွာခြားချက်များစွာ ရှိသည်။ ပါဝင်သည့် component များတွင် irreversibility ဖြစ်ပေါ်သည်။ အရည်များ ပွတ်တိုက်မှု(fluid

friction)ကြောင့် ဖြစ်ပေါ်သော ဖိအားကျဆင်းမှု(pressure drop)က irreversibility ကို ဖြစ်ပေါ်စေသည်။ အပူများသည် အနီးဝန်းကျင်သို့ ကူးပြောင်း(transfer)သွားသည်။

ပုံ(၃-၂၈)တွင် actual vapor compression refrigeration cycle ၏ T-s diagram ကို ဖော်ပြထားသည်။ Ideal cycle တွင် refrigerant များသည် evaporator မှ saturated vapor အနေဖြင့် ထွက်ခွာသွားပြီး compressor အတွင်းသို့ ဝင်ရောက်သည်ဟု ယူဆထားသည်။ သို့သော် လက်တွေ့တွင် ထိုကဲ့သို့ အတိအကျ control လုပ်ရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။ Compressor အဝင်(inlet)နေရာတွင် refrigerant ကို အနည်းငယ် superheated ဖြစ်အောင် ပြုလုပ်ထားရသည်။ လုံးဝ အငွေ့ အခြေအနေဖြစ်အောင်(completely vaporized) ပြုလုပ်ထားရသည်။ တစ်ခါတစ်ရံ evaporator နှင့် compressor ကို ဆက်ထားသည့် ပိုက်သည် အလွန်ရှည်လျားနေသည့်အခါ fluid friction ကြောင့်ဖြစ်ပေါ်သော ဖိအားကျဆင်းမှု(pressure drop)ပိုများလာနိုင်သောကြောင့် refrigerant မှ အပူများ အနီးဝန်းကျင်သို့ ကူးပြောင်းသွားသည့် ပမာဏ ပိုများလာနိုင်သည်။



ပုံ ၃-၂၈ Actual vapor compression refrigeration cycle တစ်ခု၏ schematic နှင့် T-s diagram

Connecting line တွင် အပူစုပ်ယူခြင်း(heat gain)နှင့် evaporator အတွင်း၌ ဖိအား ကျဆင်းခြင်း (pressure drop)တို့ကြောင့် superheating ဖြစ်နိုင်သည်။ Connecting line အတွင်း၌ specific volume တိုးလာခြင်းကြောင့် compressor တွင် power input ပိုများလာနိုင်သည်။

Ideal cycle တွင် compression process သည် internally reversible နှင့် adiabatic process ဖြစ်သည်။ ထို့ကြောင့် isentropic process ဖြစ်သည်။ လက်တွေ့တွင် ပွတ်တိုက်မှုများ(frictional effect)ကြောင့် entropy ပိုများလာနိုင်သည်။ အပူများဆုံးရှုံးခြင်း၊ တိုးလာခြင်း နှင့် heat transfer ဖြစ်ပေါ်ခြင်း တို့ကြောင့်လည်း entropy များခြင်း သို့မဟုတ် နည်းခြင်း ဖြစ်ပေါ်နိုင်သည်။

Process 1-2 တွင် refrigerant ၏ entropy တိုးလာလိမ့်မည်။ လက်တွေ့အခြေအနေတွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် (actual compression process) Process 1-2' တွင် refrigerant ၏ entropy နည်းသွားလိမ့်မည်။

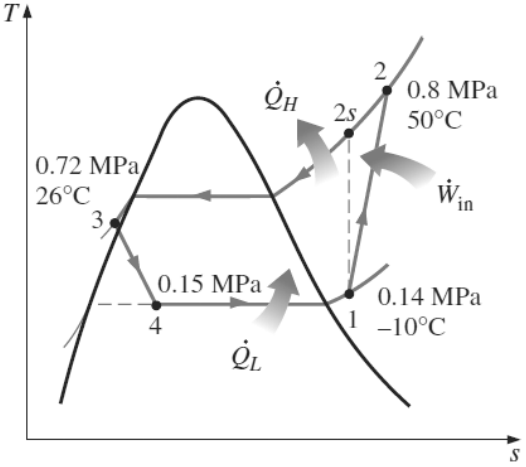
Compression process 1-2' သည် isentropic compression process ထက် ပို၍ လိုလားဖွယ် ဖြစ်သည်။ Refrigerant ၏ specific volume လျော့နည်းသွားသောကြောင့် work input လည်း လျော့နည်းသွားလိမ့်မည်။ Compression process အတွင်း၌ refrigerant ကို အေးနေအောင်ပြုလုပ်ထားနိုင်လျှင် ပိုကောင်းသည်။ လက်တွေ့တွင် ဖြစ်နိုင်ပြီး စီးပွားရေးအရ ပို၍ တွက်ခြေကိုက်သည်။ Refrigerant သည် condenser အတွင်းမှ saturated liquid အဖြစ် ထွက်သွားသည်။

Ideal အခြေအနေတွင် refrigerant သည် condenser အတွင်းမှ saturated liquid အနေဖြင့် ထွက်သွားသည်။ ထိုအချိန်၌ ဖြစ်ပေါ်သည့် ဖိအားသည် compressor exit pressure ဖြစ်သည်။ လက်တွေ့ အခြေအနေတွင် condenser ၊ throttling valve ၊ suction လိုင်း နှင့် discharge လိုင်း တို့၌ ဖြစ်ပေါ်သည့် ဖိအားကျဆင်းမှု(pressure drop)ကို ရှောင်လွှဲရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။

Condensation process တွင် saturated liquid ဖြစ်အောင် အတိအကျ control လုပ်ရန် မဖြစ်နိုင်ပေ။ Saturated liquid အဖြစ်သို့ အပြည့်အဝ မရောက်ရှိဘဲ throttling valve အတွင်းသို့ မဝင်ရောက် စေသင့်ပေ။ ထို့ကြောင့် refrigerant များကို subcooled အပူချိန်ထိရောက်အောင် ကျဆင်းစေပြီးမှ throttling valve ထဲသို့ ဝင်ရောက်စေခြင်း ဖြစ်သည်။

Evaporator အတွင်းသို့ ဝင်ရောက်လာသည့် refrigerant သည် စွမ်းအင်ပိုင်ဆိုင်မှုနည်း(low enthalpy) သောကြောင့် refrigerant space မှ အပူများကို ကောင်းစွာ စုပ်ယူနိုင်သည်။ Throttling valve နှင့် evaporator တို့သည် အလွန် နီးကပ်စွာ တည်ရှိသောကြောင့် ထိုနှစ်ခုအကြားတွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် ဖိအားကျဆင်းမှု အလွန်နည်းသည်။

၃.၇.၁ Actual Vapor Compression Refrigeration Cycle



ဥပမာ - Refrigerator တစ်လုံး၏ compressor အတွင်းသို့ refrigerant R-134a သည် အပူချိန်—10°C ၊ ဖိအား 0.14 MPa superheated vapor အနေဖြင့် ဝင်ရောက်လာသည်။ Mass flow rate သည် 0.05 kg/s ဖြစ်သည်။ Compressor မှ အပူချိန် 50°C ၊ ဖိအား 0.8 MPa ဖြင့် ထွက်သွားသည်။ Refrigerant များသည် condenser အတွင်း၌ အပူချိန် 26°C နှင့် 0.72 MPa ဖြင့် ရောက်ရှိပြီး အအေးခံသည်။ ဖိအား 0.15 MPa တွင် throttling ပြုလုပ်သည်။

ပုံ ၃-၂၁ T-s diagram ဥပမာ

တခြားသော အပူစီးကူးမှု(heat transfer)များ၊ component များ တစ်ခုနှင့် တစ်ခုအကြား ဖြစ်ပေါ်သည့် ဖိအားကျဆင်းမှု များကို ထည့်သွင်းတွက်ချက်ခြင်း မပြုဘဲ အောက်ပါတို့ကို ရှာပါ။

(၁) Refrigerated space မှ အပူဖယ်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal) နှင့် compressor ၏ စွမ်းအင်သုံးစွဲမှု (power input)

(၂) Compressor ၏ isentropic efficiency နှင့်

(၃) Refrigerator ၏ Coefficient of Performance (COP)

အဖြေ-

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

Analysis

ပုံ(၃-၂၁)တွင် refrigeration cycle ကို T-s diagram ဖြင့် ဖော်ပြထားသည်။ Condenser မှ refrigerant များသည် compressed liquid အနေဖြင့် ထွက်ခွာသွားပြီး compressor အတွင်းသို့ superheated vapor

အနေဖြင့် ဝင်ရောက်သွားသည်။ State များကို လိုက်၍ refrigerant ၏ enthalpy တန်ဖိုး အမျိုးမျိုး ပြောင်းလဲနေသည်။

P1 = 0.14 MPa, T1 = -10°C → h_1 = 246.36 kJ/kg

P2 = 0.8 MPa, T2 = 50°C → h2 = 286.69 kJ/kg

P3 = 0.72 MPa, T3 = 26°C → h3 = $h_{f @ 26°C}$ = 87.83 kJ/kg

h4 ≅ h3 (throttling) → h4 = 87.83 kJ/kg

(က) Refrigerated space မှ အပူဖယ်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal) နှင့် compressor အတွက် လိုအပ်သည့် power input ကို အောက်ပါအတိုင်း တွက်ယူနိုင်သည်။

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) = (0.05\ kg/s)\,[(246.36 - 87.83)\ kJ/kg] = 7.93\ kW$$

နှင့်

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1) = (0.05\ kg/s)\,[(286.69 - 246.36)\ kJ/kg] = 2.02\ kW$$

(ခ) Compressor ၏ isentropic efficiency

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

where the enthalpy at state 2s
(P2s = 0.8 MPa and s2s = s1 = 0.9724 kJ/kg · K) is 284.21 kJ/kg.
ထို့ကြောင့်

$$\eta_c = \frac{284.21 - 246.36}{286.69 - 246.36} = 0.939\ or\ 93.9\%$$

(ဂ) Refrigerator ၏ coefficient of performance (COP)

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{7.93\ kW}{2.02\ kW} = 3.93$$

ဆွေးနွေးချက် (discussion)

ပြီးခဲ့သည့်ဥပမာနှင့် တူညီသည်။ ကွဲပြားချက်တစ်ခုမှာ compressor inlet အဝင်တွင် refrigerant သည် superheated အပူချိန် ဖြစ်သည်။ Condenser မှ အထွက်တွင် subcooled အပူချိန် ဖြစ်သည်။ Compression process သည် isentropic ဖြစ်သည်။ Refrigerated space မှ အပူ စွန့်ထုတ်နှုန်း(heat removal rate) 10.4% ပိုများလာသည်။ Compressor ထည့်ပေးရမည့် ပါဝါ(power input)သည် 11.6% ပိုများသည်။ ထိုကြောင့် refrigerator ၏ COP သည် 3.97 မှ 3.93 အထိ ကျဆင်း သွားသည်။

၃.၇.၂ Heat Rejection by A Refrigerator

ပုံ(၃-၂၂)တွင် ဖော်ပြထားသည့် refrigerator ရှိ food compartment ကို အပူချိန် 4°C တွင် ထိန်းထားရန် လိုအပ်သည်။ အပူ စွန့်ထုတ်နှုန်း(heat removal rate)သည် 360 kJ/min ဖြစ်သည်။

Refrigerator တွင် လိုအပ်သည် power input သည် kW ဖြစ်လျှင် အောက်ပါတို့ကို ရှာပါ။

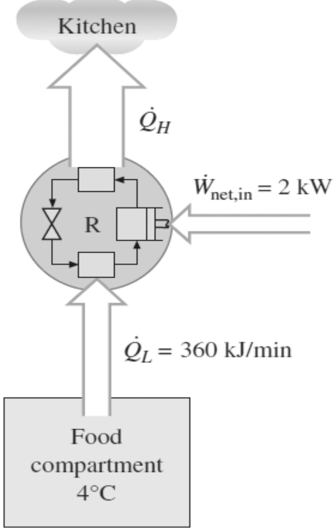
(က) Refrigerator ၏ Coefficient of Performance (COP)

(ခ) Rate of heat rejection to the room that houses the refrigerator.

Solution

Refrigerator ၏ စွမ်းအင်သုံးစွဲနှုန်း(power consumption)ကို ပေးထားသည်။ COP နှင့် အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း (rate of heat rejection)ကို အောက်ပါအတိုင်း တွက်ယူနိုင်သည်။

Assumptions Steady operating conditions exist ဟုယူဆထားသည်။



ပုံ ၃-၂၂ Schematic for example

Analysis

(က) Refrigerator ၏ COP သည် 3 ဖြစ်သည်။ တစ်နည်းအားဖြင့် refrigerated space မှ အပူ(heat) 3 kJ ဖယ်ထုတ်ရန်အတွက် compressor အတွက် 1 kJ work ထည့်ပေးရန် လိုအပ်သည်။

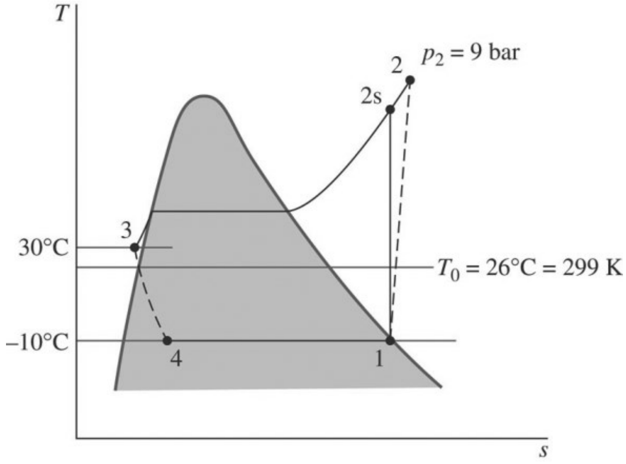
$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net\ in}} = \frac{360\ kJ/min}{2\ kW}\left(\frac{1\ \text{kW}}{60\ \text{kJ/min}}\right) = 3$$

(ခ) Refrigerator ၏ အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat rejection)

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{net\ in} = 360\ kJ/\min + (2\ kW)\left(\frac{60\ kJ/min}{1\ kW}\right) = 480\ kJ/min$$

၃.၇.၃ Vapor Compression Refrigeration Cycle ဉပမာ(၁)

R-134a ကို အသုံးပြုထားသည့် vapor-compression refrigeration cycle တစ်ခု၏ ဒေတာများကို အောက်တွင် ဇယား (table) ဖြင့် ဖော်ပြထားသည်။ Refrigerant mass flow rate သည် 0.08 kg/s ဖြစ်လျှင် အောက်ပါတို့ကို ရှာပါ။



ပုံ ၃-၂၃

(a) Compressor power (kW)
(b) Refrigeration capacity (tons)
(d) Coefficient of performance,
(c) Isentropic compressor efficiency.

State	1	2s	2	3	4
Enthalpy h (kJ/kg)	241.35	272.39	280.15	91.4	91.49
Pressure (bar)		9	9	9	
Temperature (°C)	−10			30	−10

(a) The compressor power is

$$\dot{W}_c = \dot{m}\,(h_2 - h_1)$$

$$\dot{W}_{comp} = \left(0.08\frac{kg}{s}\right)(280.15 - 241.35)kJ/kg$$

$$\dot{W}_c = 3.1\ kW$$

(b) The refrigeration capacity is

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}\,(h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{in} = \left(0.08\frac{kg}{s}\right)(241.35 - 91.49)kJ/kg$$

$$\dot{Q}_{in} = 11.99\ kW = 3.41\ RT$$

(c) The coefficient of performance is

$$COP = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)}$$

$$COP = \frac{(241.35 - 91.49)}{(280.15 - 241.35)}$$

$$COP = 3.86$$

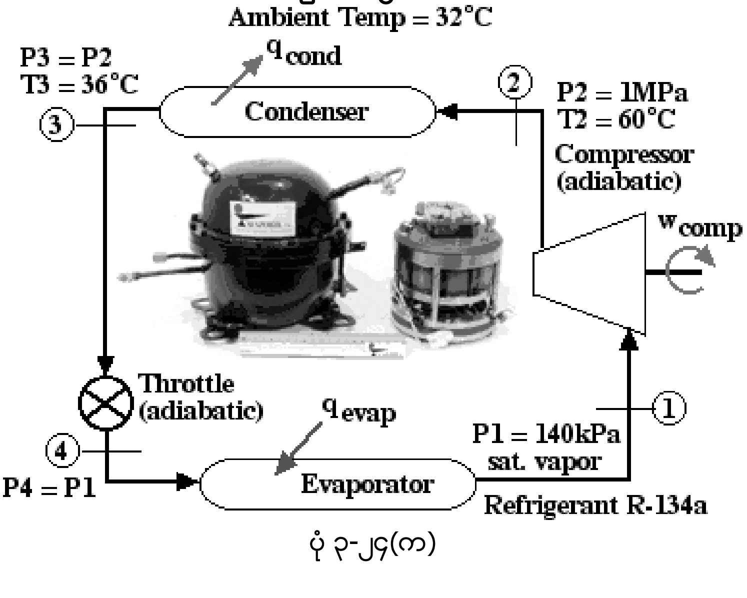
(d) The isentropic compressor efficiency is

$$Isentropic\ compressor\ efficiency = \frac{(h_{2s} - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

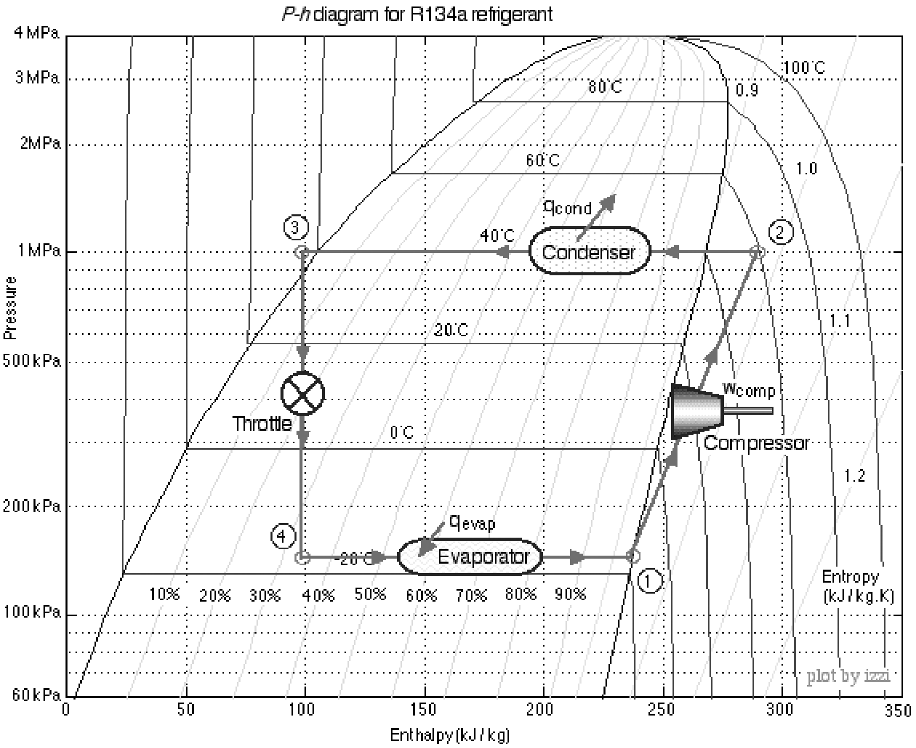
$$Isentropic\ compressor\ efficiency = \frac{(272.39 - 241.35)\ kJ/kg}{(280.15 - 241.35)\ kJ/kg}$$

$$Isentropic\ compressor\ efficiency = 0.8 = 80\%$$

၃.၇.၄ Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ (၂)



ပုံ ၃-၂၄(က)



ပုံ ၃-၂၄(ခ)

အဖြေ

ပထမ အဆင့်(step 1)အနေဖြင့် ပုစ္ဆာတွင် ပေးထားသော အချက်အလက်များကို ချရေးပါ။

Compressor inlet pressure	=	140 KPa
Compressor inlet temperature	=	-10°C
Compressor outlet pressure	=	1 MPa
ηc(isentropic efficiency of the compressor)	=	89%
$\dot{V}$(Refrigerant flow rate)		0.2 m^3/min
Throttling inlet pressure	=	0.95 MPa
Throttling inlet temperature	=	30°C
Evaporator outlet temperature	=	-18.5°C (saturated vapor)

ဒုတိယ(step 2) အနေဖြင့် တစ်ဆင့်ချင်းစီရှိ ဖိအား(pressures)၊ အပူချိန်(temperatures) တန်ဖိုးများကို ရှာပါ။

P1 = 140 kPa P2 = 1.0 MPa P3 = 0.95 MPa P4 = Unknown

T1 = -10°C T2 = Unknown T3 = 30°C T4 = Unknown

P5 = Unknown

T5 = –18.5°C

တတိယ(step 3) အနေဖြင့် ညီမျှခြင်းများကို အသုံးပြု၍ တွက်ပါ။

(a) Mass flow rate ($\dot{m}$).

$$\dot{m} = \dot{V}/\text{v}$$

(b) The power input to the compressor.

$$\dot{W_{in}} = \frac{\dot{m} \times (h_{2s} - h_1)}{\eta c}$$

(c) The rate of heat removal.

$$\dot{Q}_L = \dot{m} \times (h_5 - h_4)$$

(d) The pressure drop between the evaporator and the compressor.

$$\Delta P = P5 - P1$$

(e) The rate of heat gain in the line between the evaporator and the compressor..

$$\dot{Q}_{gain} = \dot{m}\, x\, (h_1 - h_5)$$

စတုတ္ထ(step 4) အနေဖြင့် တစ်ဆင့်ချင်းစီရှိ entropy and enthalpy တန်ဖိုးများကို တွက်ပါ။ သိရန်လိုအပ်သည့် ဖိအား(pressure) များကို တွက်ပါ။ (စာမျက်နှာ 2-30 နောက်ပိုင်းမှ table A-11 ၊ A-12 နှင့် A-13)

(a) State 1

P1 = 140 kPa

T1 = -10°C

h1 = 243.40 kJ/kg (စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13)

s1 = 0.9606 kJ/(kg K) (စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13)

v = 0.14549 m^3/kg (စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13)

(b) State 2

P2 = 1.0 MPa

T2 = Unknown

s2 = s1 = 0.9606 kJ/(kg K)

h2s = 286.04 kJ/kg (စာမျက်နှာ 2-33 နှင့် 2-34 မှ table A-13)

(c) State 3

P3 = 0.95 MPa

T3 = 30°C

h3 ≅ hf @ 30°C = 91.49 kJ/kg (စာမျက်နှာ 2-30 နှင့် 2-31 မှ table A-11)

(d) State 4

P4 = Unknown

T4 = Unknown

h4 ≅ h3 = 91.49 kJ/kg

(e) State 5

T5 = –18.5°C

Saturated vapor

P5 = 0.14287 MPa (စာမျက်နှာ 2-30 နှင့် 2-31 မှ table A-11)

h5 = 236.23 kJ/kg (စာမျက်နှာ 2-30 နှင့် 2-31 မှ table A-11)

Step 5. Plug variables into equations and solve.

$$\dot{\boldsymbol{m}} = \dot{\boldsymbol{V}} / \boldsymbol{v}$$

$$\dot{\boldsymbol{m}} = \frac{[(0.2\ m^3/min) \times (1min/60sec)]}{0.14549\ m^3/kg}$$

$$\dot{\boldsymbol{m}} = 0.0229\ \mathrm{kg/s}$$

(A) Compressor အတွက် လိုအပ်သည့် power input

$$\dot{W}_{in} = \frac{\dot{m} \times (h_{2s} - h_1)}{\eta c}$$

$$\dot{W}_{in} = \frac{0.0229\ \mathrm{kg/s} \times (286.04\ \mathrm{kJ/kg} - 243.40\ \mathrm{kJ/kg})]/}{0.89}$$

$$\dot{W}_{in} = 1.25 \text{ kW}$$

(B) အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal)

$$\dot{Q}_L = \dot{m} \times (h_5 - h_4)$$

$$\dot{Q}_L = 0.0229 \text{ kg/s } x\, (236.23 \text{ kJ/kg} - 91.49 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{Q}_L = 3.31\, kW$$

(C) Evaporator နှင့် compressor တို့အကြား ပိုက်လိုင်းတွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် ဖိအားကျဆင်းမှု(pressure drop)

$$\Delta P = P5 - P1$$

$$\Delta P = 0.14287\, MPa - 140\, kPa$$

$$\Delta P = \mathbf{2.87\, kPa}$$

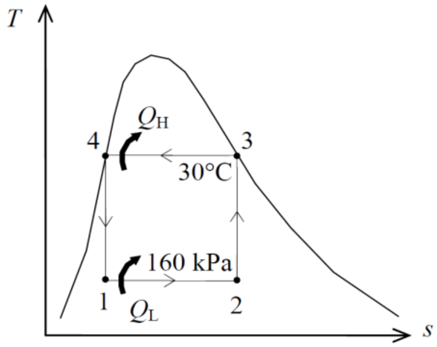
(D) Evaporator နှင့် compressor တို့အကြား ပိုက်လိုင်းတွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် rate of heat gain

$$\dot{Q}_{gain} = \dot{m} \times (h_1 - h_5)$$

$$\dot{Q}_{gain} = 0.0229 \text{ kg/s} \times (243.40 \text{ kJ/kg} - 236.23 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{Q}_{gain} = \mathbf{0.164\ kW}$$

၃.၇.၅ Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ(၃)



ပုံ ၃-၂၅

R-134a ကို refrigerant အဖြစ် အသုံးပြုထားသည့် Carnot refrigeration cycle တစ်ခုသည် steady-flow ဖြင့် မောင်းနေချိန်တွင်

(က) Coefficient of Performance (COP)

(ခ) Refrigerated space မှ စုပ်ယူလိုက်သည့် အပူပမာဏ (amount of heat absorbed) နှင့်

(ဂ) Net work input တို့ကို ရှာပါ။

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

အဖြေ - (က) TH သည် 30°C (303 K)ဖြစ်သည်။ TL သည် Tsat @ 160 kPa = -15.6°C= 257.4 K ဖြစ်သည်။ Carnot refrigerator ၏ Coefficient of Performance (COP)ကို အောက်ပါအတိုင်း တွက်ယူနိုင်သည်။

$$COP_{Ref,Carnot} = \frac{1}{\dfrac{T_H}{T_L - 1}} \qquad COP_{Ref,Carnot} = \frac{1}{\dfrac{(303)}{257.4\, K - 1}}$$

$$COP_{Ref,Carnot} = 5.64$$

(ခ) Refrigerant tables (စာမျက်နှာ 2-30 နှင့် 2-31 မှ table A-11)

$$h_3 = h_{g\,@\,30°C} = 266.66 \text{ kJ/kg}$$
$$h_4 = h_{f\,@\,30°C} = 93.58 \text{ kJ/kg}$$

ထို့ကြောင့်

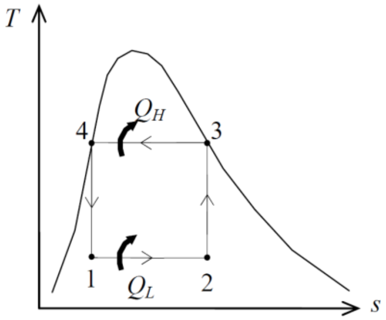
$$q_H = h_3 - h_4 = 266.66 - 93.58 = 173.08 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{q_H}{q_L} = \frac{T_H}{T_L} => q_L = \frac{T_L}{T_H} q_H = \left(\frac{257.4K}{303K}\right)(173.08kJ/kg) = \mathbf{147.03\ kJ/kg}$$

(ဂ) Net work input

$$w_{net} = q_H - q_L = 173.08 - 147.03 = \mathbf{26.05\ kJ/kg}$$

၃.၇.၆ Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ(၄)



ပုံ ၃-၂၆

Carnot refrigerator ၏ condenser အတွင်းသို့ refrigerant-134a များသည် ဖိအား 90 psia တွင် saturated vapor အဖြစ် ဝင်ရောက်လာပြီး ဖိအား quality of 0.05 ဖြင့် ထွက်သွားသည်။ Refrigerated space မှ အပူများကို pressure of 30 psia တွင် စုပ်ယူသည်။ T-s diagram ပေါ်တွင် saturation line များ ပါဝင်သည့် cycle ပုံကို ဆွဲပါ။ အောက်ပါ တန်ဖိုးများကို ရှာပါ။ (IP ယူနစ် ဥပမာ ဖြစ်သည်။)

(a) Coefficient of Performance (COP)

(b) Quality at the beginning of the heat-absorption process နှင့်

(c) Net work input

အဖြေ - Refrigerant-134a ကို အသုံးပြုထားသည့် Carnot refrigeration cycle ဖြစ်သည်။ Steady flow အခြေအနေတွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် တန်ဖိုးများကို တွက်ယူသည်။

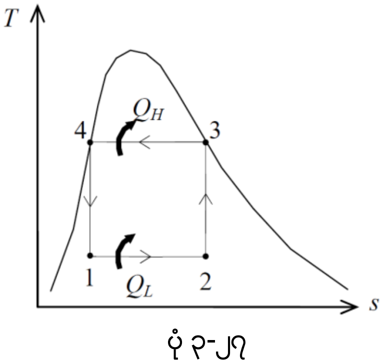
ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

Analysis

(a) Noting that $T_H = T_{sat\ @\ 90\ psia}$ = 72.78°F = 532.8 R and $T_L = T_{sat\ @\ 30\ psia}$ = 15.37°F = 475.4 R



ပုံ ၃-၂၇

$$COP_{Ref,Carnot} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L - 1}}$$

$$COP_{Ref,Carnot} = \frac{1}{\frac{(532.8R)}{475.4\,K - 1}}$$

$$COP_{Ref,Carnot} = 8.28$$

(b) Process 4-1 သည် isentropic process ဖြစ်သည်။ ထို့ကြောင့်

$$S_1 = S_4 = \left(S_f + x_4\,S_{fg}\right)_{@\ 90psia} = 0.07481 + (0.05)(0.14525)$$

$$= 0.08207\ Btu/lbm\,.\,R$$

$$x_1 = \left(\frac{S_1 - S_f}{S_{fg}}\right)_{@\,30psia} = \left(\frac{0.08207 - 0.03793}{0.18589}\right) = \mathbf{0.2374}$$

(c) T-s diagram တွင် စတုဂံအတွင်းရှိ ဧရိယာ(area enclosed) သည် net work ပမာဏနှင့် ညီမျှသည်။ s3 = sg @ 90 psia = 0.22006 Btu/lbm·R,

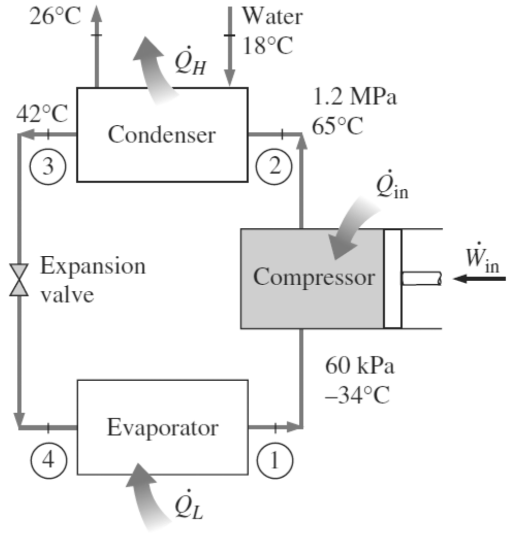
$$w_{net,in} = (T_H - T_L)(S_3 - S_4)$$

$$= (72.78 - 15.37)(0.22006 - 0.08207)\ Btu/lbm \cdot R = \mathbf{7.92\ Btu/lbm}$$

၃.၇.၇ Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ (၅)

Refrigerator တစ်လုံးတွင် R-134a ကို refrigerant အဖြစ် အသုံးပြုထားသည်။ Refrigerated space ၏ အပူချိန်သည် 30°C ဖြစ်သည်။ အပူချိန် 18°C ထဲသည့် cooling water ထဲသို့ အပူများကို စွန့်ထုတ်သည်။ Cooling water rate သည် 0.25 kg/s ဖြစ်ပြီး အပူချိန် 26°C ဖြင့် condenser မှ ထွက်သွားသည်။

Refrigerant များသည် condenser အတွင်းသို့ ဖိအား 1.2 MPa နှင့် အပူချိန် 65°C ဖြင့် ဝင်ရောက်သွားပြီး အပူချိန် 42°C ဖြင့် ပြန်ထွက်သွားသည်။ Compressor ၏ အဝင်အခြေအနေ(inlet state)သည် ဖိအား 60 kPa နှင့် အပူချိန် 34°C ဖြစ်သည်။ Compressor သည် အနီးဝန်းကျင်(surroundings)မှ အပူပမာဏ 450 W ကို စုပ်ယူသွားသည်။



ပုံ ၃-၂၈

အောက်ပါ တို့ကို ရှာပါ။

(a) Evaporator အဝင်(inlet)တွင် ရှိမည့် refrigerant ၏ quality
(b) Refrigeration load
(c) Refrigerator ၏ COP နှင့်
(d) Compressor သည် တူညီသည့် စွမ်းအင်(same power input)ကို သုံးစွဲ၍ ရရှိနိုင်မည့် theoretical maximum refrigeration load ကို ရှာပါ။

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

Analysis (a) Refrigerant-134a table များမှ တန်ဖိုးများကို ဖတ်ယူပါ။ (စာမျက်နှာ 2-30 နှင့် 2-31 မှ table A-11 နှင့် A-13 တို့မှ

$$\left.\begin{array}{l} P_1 = 60\text{ kPa} \\ T_1 = -34°\text{C} \end{array}\right\} h_1 = 230.03\text{ kJ/kg}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = 1200\text{ kPa} \\ T_2 = 65°\text{C} \end{array}\right\} h_2 = 295.16\text{ kJ/kg}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_3 = 1200\text{ kPa} \\ T_3 = 42°\text{C} \end{array}\right\} h_3 = 111.23\text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 = 111.23\text{ kJ/kg}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_4 = 60\text{ kPa} \\ h_4 = 111.23\text{ kJ/kg} \end{array}\right\} x_4 = \mathbf{0.4795}$$

ပုစ္ဆာတွင် ပေးထားသည့် အပူချိန်(given temperature)များမှ saturated liquid enthalpy ကို အသုံးပြု၍ enthalpy တန်ဖိုးများကို ရှာပါ။ အပူချိန် 18°C တွင် ရှိသည့် ရေ၏ enthalpy မှာ 75.47 kJ/kg ဖြစ်သည်။ အပူချိန် 26°C တွင် ရှိသည့် ရေ၏ enthalpy မှာ 108.94 kJ/kg ဖြစ်သည်။

$$h_{w1} = h_{f\,@\,18°\text{C}} = 75.47\ kJ/kg$$
$$h_{w2} = h_{f\,@\,26°\text{C}} = 108.94\ kJ/kg$$

(b) Refrigerant ၏ mass flow rate ကို compressor ၏ energy balance ညီမျှခြင်း(equation)မှ တွက်ယူပါ။

$$\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{R}}\,(\boldsymbol{h_2} - \boldsymbol{h_3}) = \dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{w}}\,(\boldsymbol{h_{w2}} - \boldsymbol{h_{w1}})$$

$$\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{R}}\,(295.16\ 111.23)kJ/kg = (0.25\ kg/s)(108.94\ 75.47)kJ/kg$$

$$\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{R}} = 0.0455\ kg/s$$

Refrigerant မှ transfer လုပ်ပေးသည့် waste heat ၊ compressor power input နှင့် refrigeration load တို့ကို တွက်ယူသည်။

$$\dot{\boldsymbol{Q}}_{\boldsymbol{H}} = \dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{R}}\,(\boldsymbol{h_2} - \boldsymbol{h_3}) = (0.0455\text{ kg/s})(295.16 - 111.23)\text{kJ/kg} = 8.367\text{ kW}$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}_R\,(h_2 - h_1) - \dot{Q}_{in}$$

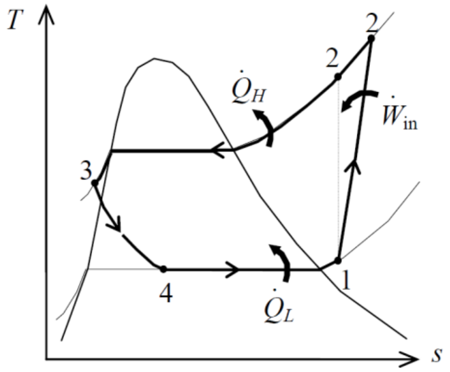
$$= (0.0455\text{ kg/s})(295.16 - 230.03)\text{kJ/kg} - 0.45\text{ kW} = 2.513\text{ kW}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{in} = 8.367 - 2.513 = 5.85\text{ kW}$$

(c) Refrigerator ၏ COP(လက်တွေ့)

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{5.85}{2.513} = 2.33$$

(d) Refrigerator ၏ reversible COP(အမြင့်ဆုံးရရှိနိုင်သည့် COP)



$$COP_{Max} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L - 1}}$$

$$COP_{Max} = \frac{1}{\frac{(18+273)}{(-30+273)} - 1}$$

$$COP_{Max} = 5.063$$

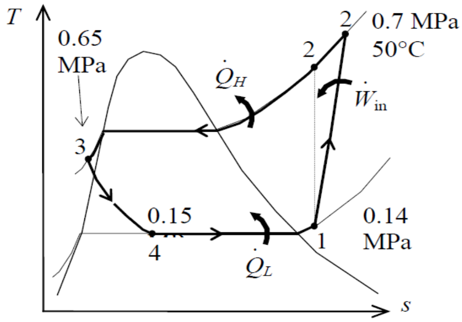
ပုံ ၃-၂၉

အများဆုံး(maximum) refrigeration load သည်

$$\dot{Q}_{L,max} = COP_{Max}\,\dot{W}_{in} = (5.063)(2.513\text{ kW}) = \mathbf{12.72\ kW}$$

၃.၇.၈ Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ(၆)

Refrigerator တစ်လုံးတွင် R-134a ကို refrigerant အဖြစ် အသုံးပြုထားသည်။ (က) Refrigerated space မှ အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal)၊ (ခ) compressor အတွက် လိုအပ်သည့် power input ၊ (ဂ) compressor ၏ isentropic efficiency နှင့် refrigerator ၏ COP တို့ကို ရှာပါ။



ပုံ ၃-၃၀

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

(က) Refrigerant table မှ တန်ဖိုးများကို ဖတ်ယူပါ။ (စာမျက်နှာ 2-32 မှ Table A-12 နှင့် A-13),

$$\left.\begin{array}{l} P_1 = 0.14\text{ MPa} \\ T_1 = -10°\text{C} \end{array}\right\} \begin{array}{l} h_1 = 246.36\text{ kJ/kg} \\ s_1 = 0.97236\text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{array}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = 0.7\text{ MPa} \\ T_2 = 50°\text{C} \end{array}\right\} h_2 = 288.53\text{ kJ/kg}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_{2s} = 0.7\text{ MPa} \\ s_{2s} = s_1 \end{array}\right\} h_{2s} = 281.16\text{ kJ/kg}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_3 = 0.65\text{ MPa} \\ T_3 = 24°\text{C} \end{array}\right\} h_3 = h_{f\ @\ 24°\text{C}} = 84.98\text{ kJ/kg}$$

$$h_4 \cong h_3 = 84.98\text{ kJ/kg (throttling)}$$

Refrigerated space မှ အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal) နှင့် compressor အတွက် လိုအပ်သည့် power input ကို တွက်ယူပါ။

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\,(h_1 - h_4) = (0.12\text{ kg/s})\,.(246.36\ 84.98)\text{ kJ/kg} = \mathbf{19.4}\ \boldsymbol{kW}$$

နှင့်

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}\,(h_2 - h_1) = (0.12\ kg/s)\ (288.53 - 246.36)\ kJ/kg\ = \mathbf{5.06\ kW}$$

(ခ) Compressor ၏ adiabatic efficiency

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{281.16 - 246.36}{288.53 - 246.36} = \mathbf{82.5}\%$$

(ဂ) Refrigerator ၏ COP

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{in}} = \frac{19.4\ \text{kW}}{5.06\ \text{kW}} = \mathbf{3.83}$$

၃.၇.၉ Vapor Compression Refrigeration Cycle ဥပမာ(၇)

Refrigerator တစ်လုံး၏ compressor အတွင်းသို့ R-134a သည် ဖိအား140 kPa ၊ အပူချိန် -10°C နှင့် စီးနှုန်း 0.3 m^3/min ဖြင့်ဝင်ရောက်လာပြီး ဖိအား 1 MPa ဖြင့် ထွက်သွားသည်။ Compressor ၏ isentropic efficiency သည် 78 percent ဖြစ်သည်။ Throttling valve အတွင်းသို့ refrigerant များ 0.95 MPa and 30°C ဖြင့် ဝင်ရောက်သွားပြီး evaporator အတွင်းမှ saturated vapor အဖြစ် အပူချိန် -18.5°C ဖြင့် ထွက်သွားသည်။ Cycle ကို T-s diagram ပေါ်တွင် saturation line များဖြင့် ရေးဆွဲပါ။ အောက်ပါ တန်ဖိုးများကို တွက်ပါ။

(က)Compressor အတွက် လိုအပ်သည့် power input

(ခ) Refrigerated space မှ အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal) နှင့်

(ဂ) ဖိအားကျဆင်းမှု(pressure drop) နှင့် evaporator နှင့် compressor အကြား ပိုက်လိုင်းတွင် တိုးလာမည့် အပူနှုန်း(rate of heat gain) ကို ရှာပါ။

အဖြေ

ယူဆချက်များ(assumptions)

(၁) Component တစ်ခုချင်းစီကို control volume အဖြစ် သတ်မှတ်ပြီး steady state အခြေအနေတွင် လေ့လာ (analyze)သည်။

(၂) Kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုများကို လျစ်လျူရှု၍ တွက်ချက်သည်။

(က)Refrigerant table များ မှ တန်ဖိုးများကို ဖတ်ယူပါ။ (စာမျက်နှာ 2-32 မှ Table A-12 နှင့် A-13),

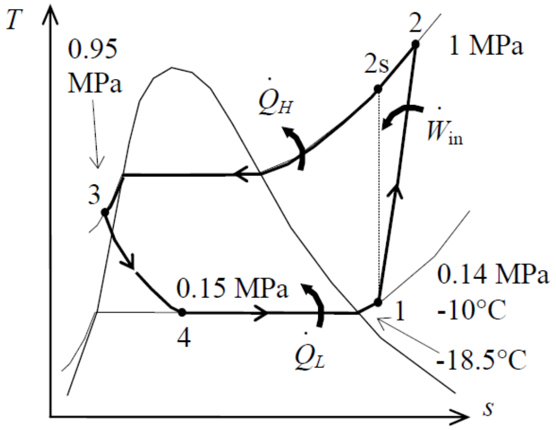
$$\left.\begin{array}{l} P_1 = 140\ \text{kPa} \\ T_1 = -10^\circ\text{C} \end{array}\right\} \begin{array}{l} h_1 = 246.36\ \text{kJ/kg} \\ s_1 = 0.97236\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K} \\ v_1 = 0.14605\ \text{m}^3/\text{kg} \end{array}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = 1.0\ \text{MPa} \\ s_{2s} = s_1 \end{array}\right\} h_{2s} = 289.20\ \text{kJ/kg}$$

$$\left.\begin{array}{l} P_3 = 0.95\ \text{MPa} \\ T_3 = 30^\circ\text{C} \end{array}\right\} h_3 \cong h_{f\ @\ 30\ ^\circ\text{C}} = 93.58\ \text{kJ/kg}$$

$$h_4 \cong h_3 = 93.58\ \text{kJ/kg}\ \text{(throttling)}$$

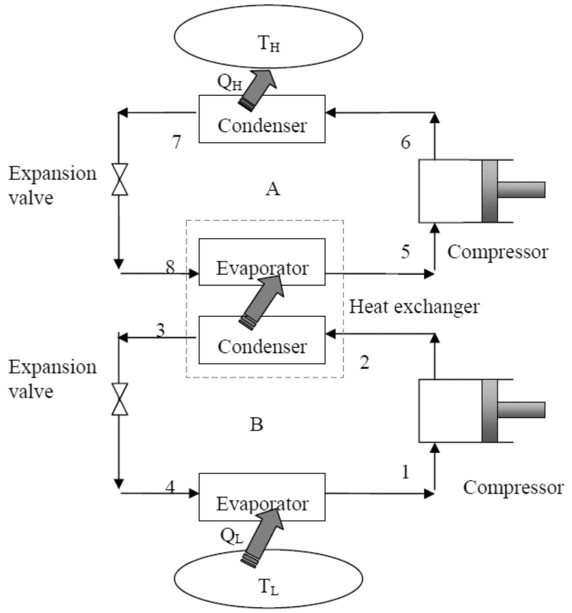
$$\left.\begin{array}{l} T_5 = -18.5^\circ\text{C} \\ \text{sat. vapor} \end{array}\right\} \begin{array}{l} P_5 = 0.14165\ \text{MPa} \\ h_5 = 239.33\ \text{kJ/kg} \end{array}$$



ပုံ ၃-၃၁

အဖြေ (a) 1.88 kW, (b) 4.99 kW, (c) 1.65 kPa, 0.241 kW

၃.၈ Cascade Refrigeration Cycles

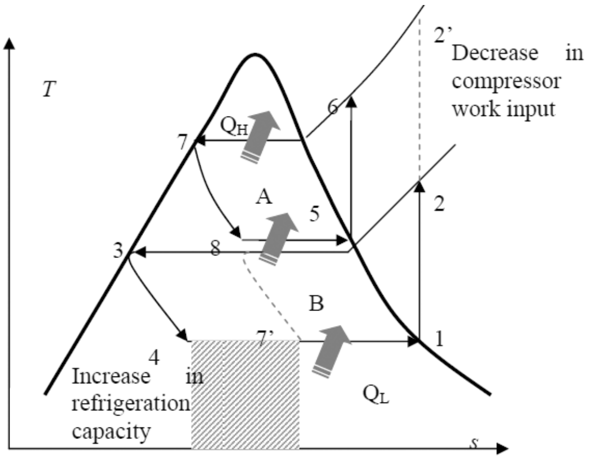


စက်မှုလုပ်ငန်းများတွင် အလွန်နိမ့်သည့် အပူချိန်ရရှိရန် လိုအပ်သည်။ အပူချိန် ကွာခြားချက် အလွန် များလျှင် compression ratio များများ ရရန်လိုအပ်သည်။

ဖိအား(pressure range)ကွာခြားချက် အလွန် များခြင်းကြောင့် compressor ၏ စွမ်းဆောင်ရည် (performance) ညံ့ဖျင်းလိမ့်မည်။

ထိုပြဿနာကို ဖြေရှင်းရန် refrigeration cycle များကို အတန်းလိုက် ပုံစံမျိုး(series) ဖြစ်အောင် ပြုလုပ်ခြင်းဖြင့် cascade refrigeration cycle များ တည်ဆောက် နိုင်သည်။

ပုံ ၃-၃၂(က) Two stage cascade refrigeration cycle



ပုံ ၃-၃၂(ခ) Two-stage cascade refrigeration system တစ်ခု၏ T-s diagram

ပုံ(၃-၃၂)တွင် two-stage cascade refrigeration cycle တစ်ခုကို ဖော်ပြထားသည်။ Cycle နှစ်ခုကို heat exchanger ဖြင့် ဆက်ထားသည်။ Topping cycle (cycle A) ၏ evaporator နှင့် bottoming cycle (cycle B) ၏ condenser တို့ကို heat exchanger ဖြင့် ဆက်ထားသည်။ Heat exchanger ကို ကောင်းစွာ insulate လုပ်ထားသည်။ Heat exchanger အတွင်း၌ kinetic energy နှင့် potential energy ပြောင်းလဲမှုတို့ကို လျစ်လျူရှု ထားသည်။ Bottoming cycle မှ topping cycle သို့ ကူးပြောင်းသွားသည့် အပူပမာဏ တူညီသည်ဟု သတ်မှတ်သည်။ Cycle ခုချင်းစီ၏ mass flow rate တူညီကြသည်။ Cycle နှစ်ခုစလုံးတွင် ရှိသည့် refrigerant အမျိုးအစား တူညီကြသည်။ Heat exchanger အတွင်း၌ fluid များ တစ်ခုနှင့်တစ်ခု မရောနှောအောင် ပြုလုပ် ထားသည်။

Cascade refrigeration cycle ဆိုသည်မှာ နှစ်ခု သို့မဟုတ် နှစ်ခုထက်ပိုသည့် refrigeration cycle များကို အတန်းလိုက်ပုံစံ(series)ဖြင့် တပ်ဆင်မောင်းနှင်သည့် refrigeration cycle ကို ဆိုလိုသည်။ နိမ့်သည့်အပူချိန်(TL) နှင့် မြင့်သည့် အပူချိန်(TH)တို့ ကွာခြားမှု အလွန်များလျှင် cascade cycle ကို အသုံးပြုရန် လိုအပ်သည်။ ပုံ(၃-၃၂) low

temperature refrigerator အတွက် condenser သည် high temperature refrigerator ၏ evaporator ဖြစ်သည်။ တစ်နည်းအားဖြင့် low temperature refrigerator မှ အပူများကို high temperature refrigerator အတွင်းသို့ စွန့်ထုတ်သည်။

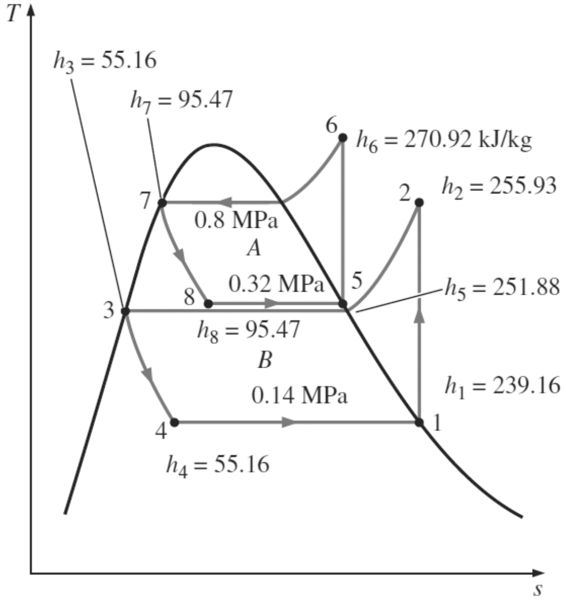
Cascading လုပ်ခြင်းဖြင့် refrigeration cycle ၏ COP ပိုကောင်းနိုင်သည်။ နိမ့်သည့်အပူချိန်(TL) နှင့် မြင့်သည့် အပူချိန်(TH) တို့ကို လိုက်၍ သင့်လျော်သည့် evaporator pressure နှင့် condenser pressure ကို သတ်မှတ်ပြီး လိုအပ်ချက်နှင့် အကိုက်ညီဆုံးသော refrigerant ကို ရွေးချယ်နိုင်သည်။

Low temperature cycle နှင့် high temperature cycle ကို heat exchanger များဖြင့် ဆက်ထားသည်။ ထို heat exchanger သည် cycle A တွင် evaporator အဖြစ် cycle B တွင် condenser အဖြစ် အသီးသီး ဆောင်ရွက်ကြသည်။ ထို့ကြောင့် အောက်ပါညီမျခြင်းဖြင့် ဖော်ပြနိုင်သည်။ ပုံ (၃-၃၂-က) နှင့် ပုံ (၃-၃၂-ခ)မှ

$$\dot{m}_A(h_5 - h_8) = \dot{m}_B(h_2 - h_3)$$

$$COP_{R,cascade} = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)}$$

ပုံ(၃-၃၂-ခ)တွင် refrigeration capacity (area under 4-7′) တိုးလာပုံ နှင့် compressor work (2-2′-6-5) လျော့နည်းသွားပုံကို ဖော်ပြထားသည်။ ပုံ(၃-၃၁-ခ)T-s diagram အရ cascading လုပ်ခြင်းကြောင့် compressor work လျော့နည်းသွားသည်။ Refrigerated space မှ စုပ်ယူလိုက်သည့် အပူ(heat)ပမာဏ ပိုများလာသည်။ ထို့ကြောင့် refrigeration system ၏ COP ပိုကောင်းလာသည်။ တချို့သော refrigeration system များတွင် သုံးဆင့် (three stage) သို့မဟုတ် လေးဆင့်(four stages) cascading cycle များကို အသုံးပြုကြသည်။



ပုံ ၃-၃၃ Two-Stage Cascade Refrigeration Cycle ဥပမာ

Two-Stage Cascade Refrigeration Cycle ဥပမာ-

ပုံ(၃-၃၁)မှ two stage cascade refrigeration system တစ်ခုသည် ဖိအား 0.8 နှင့် 0.14 MPa အကြားတွင် မောင်းနိုင်အောင် ဒီဇိုင်းပြုလုပ်ထားသည်။ Refrigerant R-134a ကို working fluid အဖြစ် အသုံးပြု ထားသည်။ Stage တစ်ခုချင်းစီကို ideal vapor compression refrigeration cycle အဖြစ် ယူဆသည်။ Lower cycle မှ upper cycle အတွင်းသို့ အပူစွန့်ထုတ်ခြင်း(heat rejection)ဖြစ်စဉ်သည် heat exchanger အတွင်း၌ adiabatic counter flow ဖြင့် ဖြစ်ပေါ်သည်။ Refrigerant stream နှစ်မျိုးလုံးသည် ဖိအား 0.32 MPa ဖြင့် heat exchanger

အတွင်းသို့ ဝင်ရောက် လာသည်။ Refrigerant စီးနှုန်း(mass flow rate) သည် 0.05 kg/s ဖြစ်လျှင် အောက်ပါတို့ကို ရှာပါ။

(၁)Lower cycle တွင် ဖြစ်ပေါ်မည့် refrigerant mass flow rate ကို ရှာပါ။
(၂)Refrigerated space မှ အပူဖယ်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal)နှင့် compressor ၏ စွမ်းအင်သုံးစွဲမှု (power input)ကို ရှာပါ။
(၃)COP ကိုရှာပါ။

ယူဆချက်များ(assumption) (က) Steady operation
(ခ) ΔKE=ΔPE=0
(ဂ) Adiabatic heat exchanger

ပုံ(၃-၃၃) တွင် cascade cycle ၏ T-s diagram ကို ဖော်ပြထားသည်။ Stage (၈) ဆင့်၏ enthalpy များကို refrigerant R-134a ဂုဏ်သတ္တိ(property)ဇယားမှ ဖတ်ယူနိုင်သည်။ (Tables A-11 ၊ A-12 နှင့် A-13)
(၁) Heat exchanger ၏ energy balance ညီမျှခြင်းမှ တစ်ဆင့် တွက်ယူနိုင်သည်။
Lower cycle တွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် refrigerant mass flow rate

$$\dot{m}_A h_5 + \dot{m}_B h_3 = \dot{m}_A h_8 + \dot{m}_A h_2$$

$$\dot{m}_A (h_5 - h_8) = \dot{m}_B (h_2 - h_3)$$

$$0.05\ kg/s\ (251.88 - 95.47)\ kJ/kg = \dot{m}_B\ (255.93 - 55.16) kJ/kg$$

$$\dot{m}_B = 0.093\ kg/s$$

(၂) Cascade cycle မှ စွန့်ထုတ်မည့် အပူပမာဏ(heat removal)ကို အောက်ပါအတိုင်း တွက်ယူနိုင်သည်။

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_B((h_1 - h_4) = 0.0390\ kg/s\ (239.16 - 55.15) kJ/kg = 7.18\ kW$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{W}_{comp1,in} + \dot{W}_{comp2,in} = \dot{m}_A (h_6 - h_5) + \dot{m}_B (h_2 - h_1) = 1.61\ kW$$

(၃) Cycle ၏ COP

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net,in}} = \frac{7.18\ kW}{1.61\ kW} = 4.46$$

$$\dot{m}_A(h_5 - h_8) = \dot{m}_B (h_2 - h_3)$$

$$\frac{\dot{m}_A}{\dot{m}_B} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_5 - h_8)}$$

$$COP_{R,cascade} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net}} = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) = \dot{m}_B(h_2 - h_1)}$$

၃.၈.၁ Compound Systems

Cascade refrigeration cycle ကို compound system ဟူ၍လည်း ခေါ်လေ့ရှိသည်။ Cascade refrigeration cycle တစ်ခုတွင် နှစ်လုံး သို့မဟုတ် နှစ်လုံးထက် ပိုများသည့် compressor များကို အတန်းလိုက် ဆက်ထားသည်။ Compressor များကို intercooling နှင့် desuperheating မပြုလုပ်ဘဲ အတန်းလိုက်(in series) ဆက်ထားသည့်အခါ single compression အဖြစ် သတ်မှတ်နိုင်သည်။ Compound system အဖြစ် မသတ်မှတ်ပေ။ Compound system အဖြစ် သတ်မှတ်ရန် အတွက် intercooler ၊ economizer သို့မဟုတ် subcooler စသည့် ကိရိယာများ ပါဝင်ရန် လိုအပ်သည်။

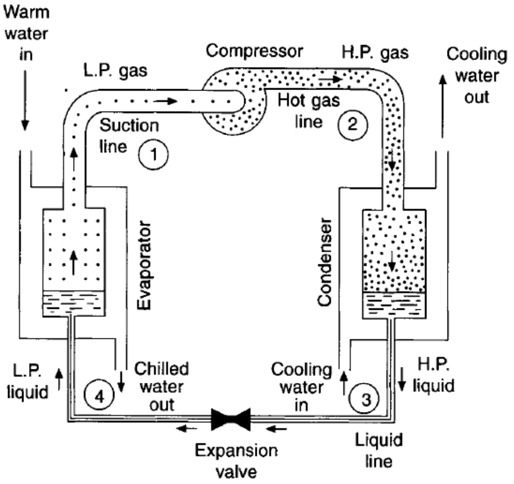
Compound system တစ်ခု၏ ရည်ရွယ်ချက်များမှာ

(၁) Refrigeration effect ပိုများစေရန်
(၂) Compressor အထွက် အပူချိန် (discharge temperature) နိမ့်ကျစေရန်
(၃) Equipment အရွယ်အစား(size) သေးငယ်စေရန်
(၄) System ၏ စွမ်းအင်သုံးစွဲမှု(power consumption)လျော့နည်းစေရန် နှင့်
(၅) နှစ်စဉ်ကုန်ကျစရိတ်(annual operation expenses) လျော့နည်းစေရန် တို့ ဖြစ်သည်။

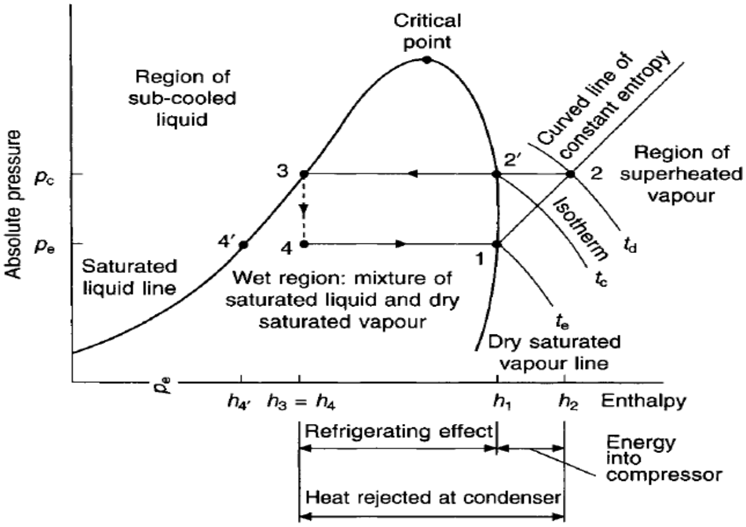
Compound system အများစုသည် 2-stage compression system များ ဖြစ်ကြသည်။ 2-stage system သည် single system နှစ်ခုကို intermediate flash intercooler သို့မဟုတ် liquid subcooling type intercooler ဖြင့် ဖွဲ့စည်းတည်ဆောက်ထားသည်။ 2-stage compression၏ ကြားခံ ဖိအား(intermediate pressure) ကို အောက်ပါ ပုံသေနည်းဖြင့် တွက်ယူနိုင်သည်။

$$Pi = \sqrt{P1 \times P2}$$

Intermediate pressure (Pi) တွင် ဖြစ်ပေါ်သည့် saturated temperature သည် 2-stage compound system ၏ intermediate temperature ဖြစ်သည်။



ပုံ ၃-၃၄(က) Basic vapor compression cycle applied to a water chiller.



ပုံ ၃-၃၄(ခ) Simple saturation refrigeration cycle on a pressure-enthalpy diagram

၃.၉ လေ့ကျင့်ရန် ပုစ္ဆာများ

Refrigeration System Components

(၁) What are the major components of a vapor compression refrigeration system?

Compressors

(၂) What are the two main functions of a compressor in a refrigeration cycle?

(၃) What are the two main categories of refrigerant compressors?

(၄) What are the desirable characteristics of a compressor?

(၅) What criteria are considered in the selection of a proper refrigerant compressor?

(၆) What are the main characteristics of hermetic compressors?

(၇) What are the main applications of semi-hermetic compressors?

(၈) What is the difference between hermetic and semi-hermetic compressors?

(၉) What are the three types of positive displacement compressors?

(၁၀) What are the main parameters affecting the efficiencies of reciprocating compressors?

(၁၁) What are the general design configurations of rotary compressors?

(၁၂) Describe operating principle of rotary compressors.

(၁၃) What are the suitable applications of rotary compressors?

(၁၄) What are the basic advantages of vane compressors?

(၁၅) Is screw compressor a positive displacement compressor? What is the temperature range for screw compressors?

(၁၆) Describe the operating principle of a screw compressor?

(၁၇) What are the basic advantages of screw compressors?

(၁၈) What is the basic operating principle of dynamic compressors? What are the main types?

(၁၉) What are the suitable applications of centrifugal compressors in place of positive displacement compressors? What is the suitable load range for centrifugal compressors?

(၂၀) What is the basic operating principle of a centrifugal compressor?

(၂၁) How are compressors rated? Define compression ratio for a compressor.

(၂၂) What are the factors influencing the performance of a compressor?

(၂၃) Does lowering suction temperature decrease the power input to a refrigerant compressor? Explain.

(၂၄) It is known that the higher the compression ratio of a compressor the lower the efficiency. Explain how the higher compression ratios be avoided.

(၂၅) List the methods of compressor capacity control.

(၂၆) Refrigerant-134a enters the compressor of a refrigeration cycle at 120 kPa gauge pressure. The condenser is maintained at an absolute pressure of 800 kPa. If the atmospheric pressure is 95 kPa, determine the compression ratio of the compressor.

(၂၇) Refrigerant-134a enters the compressor of a refrigeration cycle at 100 kPa and −20°C with a flow rate of 1.8 m3/min and leaves at 700 kPa and 50°C. Determine

(a) the power input,

(b) the isentropic efficiency, and

(c) the exergy destruction and the exergy efficiency of the compressor. Take T0 = 25°C.

(၂၈) Refrigerant-134a enters the compressor of a refrigeration cycle at 160 kPa as a saturated vapor with a flow rate of 6.5 m3/min and leaves at 900 kPa. The compressor isentropic efficiency is 75%. Determine (a) the temperature of R-134a at the exit of the compressor and (b) the exergy destruction and the exergy efficiency of the compressor. Take T0 = 25°C.

(၂၉) Refrigerant-134a enters the compressor of a refrigeration cycle at 100 kPa and −20°C with a flow rate of 0.18 m3/min and leaves at 700 kPa and 50°C. The ratio of the clearance volume to the displacement volume is 0.05. Determine the volumetric efficiency of the compressor.

(၃၀) Refrigerant-134a enters the compressor of a refrigeration cycle at 160 kPa as a saturated vapor and leaves at 900 kPa. The compressor volumetric efficiency is 85% and the ratio of the clearance volume to the displacement volume is 0.04. Determine the temperature of R-134a at the exit of the compressor.

(၃၁) Refrigerant-134a enters the evaporator of a refrigeration cycle at 200 kPa with a vapor mass fraction of 0.15 and leaves at 1200 kPa as a saturated vapor with a flow rate of 0.045 m3/min. The volumetric efficiency of the compressor is 92%. Determine the refrigeration capacity of the system.

Condensers

(၃၂) What criteria are used in the selection of condensers?

(၃၃) What are the main types of condensers?

(၃၄) What are the advantages and disadvantages of air-cooled condensers?

(၃၅) Describe the operating principle of a cooling tower.

(၃၆) What is the effect of climatic conditions on the effectiveness of evaporative condensers?

(၃၇) Refrigerant-134a enters the condenser of a refrigeration cycle at 1000 kPa and 80°C with a flow rate of 0.038 kg/s and leaves at the same pressure subcooled by 4.4 °C. The refrigerant is condensed by rejecting its heat to water, which experiences a temperature rise of 9°C. Determine

(a) the rate of heat rejected in the condenser,

(b) the mass flow rate of water, and

(c) the rate of cooling if the COP of this refrigeration cycle at these conditions is 1.4.

(၃၈) Heat is rejected from the condenser of a heat pump cycle by refrigerant-134a entering at 700 kPa and 50°C at a rate of 105 kg/h and leaves as a saturated liquid. Determine (a) the temperature of R-134a at the condenser exit, (b) the volume flow rate at the exit of the condenser in L/min, (c) the COP of the heat pump if the rate of heat absorbed in the evaporator is 12,000 Btu/h, and (d) the rate of exergy destruction. Take T0 = 77°F.

(၃၉) A vapor compression refrigeration cycle uses ammonia as the working fluid. Heat is rejected from ammonia to air in the condenser. The air enters at 70°F at a rate of 45 lbm/min and leaves at 85°F. Ammonia experiences an enthalpy change of 86 Btu/lbm as it flows through the condenser. Determine

(a) the rate of heat rejected in the condenser in Btu/h and

(b) the ratio of mass flow rates of air and ammonia. Take the specific heat of air to be 0.240 Btu/lbm °F.

Evaporators

(၄၀) How can evaporators be classified?

(၄၁) List some applications of liquid coolers in refrigeration.

(၄၂) What is the difference between the operation of a flooded evaporator and a direct expansion evaporator (also called dry cooler)? Which one is more preferable?

(၄၃) Heat is absorbed from a cooled space at a rate of 320 kJ/min by refrigerant-22 that enters the evaporator at −10 °C with a quality of 0.3 and leaves as saturated vapor at the same pressure. Determine the volume flow rates of R-22 at the compressor inlet and outlet. The properties of R-22 at the inlet and exit of the evaporator are as follows: h1 = 252.16 kJ/kg, v1 = 0.02010 m3/kg, h2 = 401.10 kJ/kg, v2 = 0.06523 m3/kg

(၄၄) Refrigerant-134a enters the expansion valve of a refrigeration cycle at 900 kPa as a saturated liquid with a flow rate of 150 L/h. R-134a leaves the evaporator at 100 kPa superheated by 6.4°C. The refrigerant is evaporated by absorbing heat from air which is cooled from 15 to 2°C. Determine

(a) the rate of heat absorbed in the evaporator,

(b) the mass flow rate of air,

(c) the COP of the cycle if the compressor work input is 72.5 kJ/kg, and

(d) the rate of entropy generation and exergy destruction in the evaporator. Take T0 = 25°C.

(၄၅) A heat pump operates on a vapor compression refrigeration cycle with R-134a as the refrigerant. R-134a enters the evaporator at −12.7°C with a vapor mass fraction of 27% and leaves at the same pressure as a saturated vapor. The refrigerant is evaporated by absorbing heat from ambient air at 0 °C. Determine

(a) the amount of heat absorbed from the ambient air and

(b) the exergy destruction in the evaporator, both per unit mass flow rate of the refrigerant.

Throttling Devices

(၄၆) List the most common throttling devices.

(၄၇) Can thermostatic expansion valves control the rate of liquid-refrigerant flow to the evaporator? If so, how is this done?

(၄၈) If there is no temperature drop across a thermostatic expansion valve, what could be the reason? Explain.

(၄၉) Explain characteristics of capillary tubes.

(၅၀) Refrigerant-134a enters the throttling valve of a heat pump system at 200 psia as a saturated liquid and leaves at 20 psia. Determine

(a) the temperature drop across the throttling valve and

(b) the entropy generation and the exergy destruction during this process. Take T0 = 77°F.

(၅၁) Refrigerant-502 (a blend of R-115 and R-22) enters the throttling valve of a heat pump system at 45°C as a saturated liquid and leaves at −22°C as a mixture of saturated liquid and vapor. Determine

(a) the pressures at the inlet and exit of the valve and the vapor mass fraction at the exit and

(b) the entropy generation during this process. R-502 properties are not available in the book. Use other sources to solve this problem.

Auxiliary Devices

(၅၂) List auxiliary devices used in refrigeration systems.

(၅၃) What is the purpose of using an accumulator?

(၅၄) What is the purpose of using a receiver?

(၅၅) What is the purpose of using an oil separator?

(၅၆) What is the purpose of using a strainer? What types are available?

(၅၇) What is the purpose of using a drier? Which factors influence the selection of the correct size of a drier?

(၅၈) What is the purpose of using a check valve?

(၅၉) Describe the operation of a defrost controller with timer.

Problem: A steady-flow Carnot refrigeration cycle uses refrigerant- 134a as the working fluid. The refrigerant changes from saturated vapor to saturated liquid at 30°C in the condenser as it rejects heat. The evaporator pressure is 160 kPa. Show the cycle on a T-s diagram relative to saturation lines, and determine

(a) the coefficient of performance,

(b) the amount of heat absorbed from the refrigerated space, and

(c) the net work input.

Answers: (a) 5.64, (b) 147 kJ/kg, (c) 26.1 kJ/kg

Problem: A refrigerator uses refrigerant-134a as the working fluid and operates on an ideal vapor compression refrigeration cycle between 0.12 and 0.7 MPa. The mass flow rate of the refrigerant is 0.05 kg/s. Show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines.

Determine

(a) the rate of heat removal from the refrigerated space and the power input to the compressor,

(b) the rate of heat rejection to the environment, and

(c) the coefficient of performance.

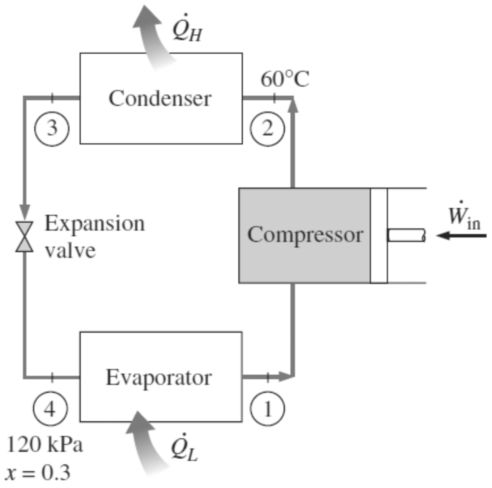
Answers: (a) 7.41 kW, 1.83 kW, (b) 9.23 kW, (c) 4.06

Problem: 11–18 Refrigerant-134a enters the compressor of a refrigerator as superheated vapor at 0.14 MPa and -10°C at a rate of 0.12 kg/s, and it leaves at 0.7 MPa and 50°C. The refrigerant is cooled in the condenser to 24°C and 0.65 MPa, and it is throttled to 0.15 MPa. Disregarding any heat transfer and pressure drops in the connecting lines between the components, show the cycle on a T-s diagram with respect to saturation lines, and determine

(a) the rate of heat removal from the refrigerated space and the power input to the compressor,
(b) the isentropic efficiency of the compressor, and
(c) the COP of the refrigerator.

Answers: (a) 19.4 kW, 5.06 kW, (b) 82.5 percent, (c) 3.83

Problem: 11–22 A refrigerator uses refrigerant-134a as the working fluid and operates on the ideal vapor compression refrigeration cycle. The refrigerant enters the evaporator at 120 kPa with a quality of 30 percent and leaves the compressor at 60°C. If the compressor consumes 450 W of power, determine
(a) the mass flow rate of the refrigerant, (b) the condenser pressure, and (c) the COP of the refrigerator.
Answers: (a) 0.00727 kg/s, (b) 672 kPa, (c) 2.43



၃.၁၀ Problems

(၁) R-12 ကို အသုံးပြုထားသော theoretical cycle တစ်ခုတွင် condensing temperature သည် 85°F ဖြစ်ပြီး evaporating temperature သည် 25°F ဖြစ်သည်။ ထို cycle အတွက်
   (၁) Compressor work done (Btu/lb)
   (၂) Refrringeration effect (Btu/lb)
   (၃) Heat rejected in condenser (Btu/lb)
   (၄) C.O.P နှင့်
   (၅) Quality of refrigerant after expansion တို့ကိုရှာပါ။

(၂) R-12 အသုံးပြုသော ရေခဲစက်တစ်လုံး၌ compressor တစ်လုံးတွင် ဆလင်ဒါ(၄)လုံး တပ်ဆင်ထားသည်။ ဆလင်ဒါ တစ်လုံး၏ bore သည် 3 inches ဖြစ်ပြီး stroke သည် 4 inches ဖြစ်သည်။ R.P.M 600 rpm ဖြင့် မောင်းလျှင် condensing pressure သည် 108 psi နှင့် evaporating pressure သည် 25 psi ဖြစ်လိမ့်မည်ဟု ယူဆက theoretical cycle ၏ အောက်ပါတန်ဖိုးများကို ရှာပါ။ [IP ယူနစ်]
   (၁) Refrigeration capacity (RT)
   (၂) Theorecical horse power(HP) required

(၃) Theorectical cycle မဟုတ်ဘဲ ဖိသိပ်ရာတွင် pv 1.2 = C ဖြစ်ခဲ့လျှင် လိုအပ်မည့် မြင်းကောင်ရေနှင့် compressor မှ စွန့်ထုတ်မည့် အပူပမာဏတို့ကို ရှာပါ။

(၃) R-12 အသုံးပြုသော ရေခဲစက်တစ်လုံးကို 25 ton of refrigeration ထုတ်လုပ်နိုင်အောင် ဒီဇိုင်း လုပ်ထားသည်။ Condenser pressure သည် 135 PSI ဖြစ်ပြီး evaporator pressure သည် 30 PSI ဖြစ်သည်။ Standard cycle ဟု ယူဆလျက် အောက်ပါ တန်ဖိုးများကို ရှာပါ။ [IP ယူနစ်]

(၁) Mass flow rate of refrigerant (lb/min)

(၂) Piston displacement of compressor (ft^3/Min)

(၃) Horse power required of compressor တို့ကိုရှာပါ။

(၄) Freon အသုံးပြုသော standard cycle သည် condensing temperature 90°F နှင့် evaporating temperature 0°F ကြားတွင် အလုပ်လုပ်နေသည်။ Refrigerant 1lb အတွက်

(၁) ရရှိမည့် refrigeration effect

(၂) Refrigeration effect 1 RT ရရှိရန်အတွက် လိုအပ်မည့် lb/min

(၃) Compressor အတွင်း ဝင်ရောက်မည့် ထုထည်စီးနှုန်း (volume flow rate)

(၄) လိုအပ်မည့် H.P

(၅) C.O.P နှင့်

(၆) Condenser အတွင်း စွန့်ထုတ်မည့် အပူပမာဏ (amount of heat rejection)တို့ကို ရှာပါ။

(၅) 3 tons of refrigeration ထုတ်လုပ်ပေးနေသော ရေခဲစက်တစ်လုံးသည် 350 rpm ဖြင့် လည်ပတ်နေသည်။ Condenser temperature 100°F နှင့် evaporator temperature 10°F ရှိနေရန် လိုအပ်သည်။ အသုံးပြုမည့် compressor အရွယ်အစားမှာ stroke = 1.5 bore ဖြစ်သည်။ Standard cycle ဟု ယူဆ၍ အောက်ပါ ဓာတ်ငွေ့များ အသုံးပြုလျှင် လိုအပ်မည့် compressor အတိုင်းအတာများကို ရှာပါ။ [IP ယူနစ်]

(A) R - 12, (B) R - 22, (C) R - 717

(၆) R - 12 အသုံးပြုနေသော vapor compression cycle တစ်ခုတွင် evaporator temperature သည် 25°C ဖြစ်ပြီး condenser temperature သည် 85°C ဖြစ်သည်။

(၁) Compressor အထွက်ရှိဓာတ်ငွေ့၏ အပူချိန်(discharge temperature)

(၂) Compressor work done(Btu/lb)

(၃) Heat rejected in condenser (Btu/lb)

(၄) Evaporator အဝင်ရှိ refrigerant quality

(၅) C.O.P တို့ကို ရှာပါ။ (Cp = 1473 Btu/lb °R ဖြစ်သည်။)

(၇) အမိုးနီးယားဓာတ်ငွေ့သုံး ရေခဲစက်တစ်လုံးတွင် displacement capacity 10.9ft^3/min ရှိသော compressor ကို အသုံးပြုသည်။ Condensing temperature သည် 85°F ဖြစ်ပြီး evaporating temperature သည် 10°F ဖြစ်သည်။ Compressor အထွက် enthalpy သည် 655 Btu/lb ဖြစ်ပြီး standard cycle ဟု ယူဆလျက် အောက်ပါတို့ကို ရှာပါ။ (Take Cp= 0.7 Btu/lb°F)

(၁) Compressor အထွက် ဓာတ်ငွေ့၏ အပူချိန်

(၂) Quality of refrigerant after expansion

(၃) Refrigerant mass flow rate (lb/min)

(၄) H.P required for the compressor

(၅) Water cooled condenser ကို အသုံးပြုထားပြီး ရေအဝင်အထွက် အပူချိန်ခြားနားခြင်း 10°F သာ ထားရှိ လိုသော် လိုအပ်မည့် ရေထုထည်စီးနှုန်း(gal/min) တို့ကိုရှာပါ။

(၈) Ammonia vapor compression cycle တစ်ခုသည် 50psia နှင့် 160 psia ကြားတွင် အလုပ်လုပ်နေသည်။

Compressor အထွက် အပူချိန်သည် 85°F ဖြစ်ပြီး စုစုပေါင်း(total) enthalpy သည် 675.8 Btu/lb ဖြစ်သည်။ Condenser အထွက်အပူချိန် သည် 60°F ဖြစ်ပြီး enthalpy သည် 109.2 Btu/lb ဖြစ်သည်။ Condenser မှ 450 Btu/min နှုန်းဖြင့် အပူစွန့်ထုတ်နေလျှင် အောက်ပါတို့၏ တန်ဖိုးများကို ရှာပါ။

(၁) Mass flow rate of refrigerant (lb/min)

(၂) H.P required of compressor

(၃) Tons of refrigeration

(၄) C.O.P

(၉) Freon 12 အသုံးပြုနေသော ရေခဲစက်(ice plant)တစ်ခုတွင် evaporating temperature သည် - 30°F ဖြစ်ပြီး condensing temperature သည် 80°F ဖြစ်သည်။ Refrigerant စီးနှုန်း(mass flow rate) သည် 5 lb/min ဖြစ်ခဲ့လျှင်

(၁) Refrigeration effect (Btu/min)

(၂) Cooling capacity(ton) တို့ကို ရှာပါ။

(၁၀) Ammonia ဓာတ်ငွေ့သုံး ရေခဲစက်တစ်ခု၏ capacity သည် 18 tons ဖြစ်၍ condenser temperature သည် 120°F ဖြစ်ပြီး evaporator temperature သည် 40°F ကြားတွင် အလုပ်လုပ်နေသည်။ Standard cycle ဟု ယူဆ၍ (က) mass flow rate (lb/min) ၊ (ခ) volume flow rate (ft^3/min) တို့ကို ရှာပါ။

(၁၁) Refrigeration system တစ်ခုတွင် R-12 ကို သုံးထားပြီး၊ evaporator temperature သည် 40°F ဖြစ်ပြီး condenser temperature သည် 120°F ဖြစ်သည်။ (က) cooling capacity (Btu/Ib) ၊ (ခ) mass flow rate (lb/ min/ton) ၊ (ဂ) C.O.P တို့ကို ရှာပါ။

(၁၂) ရေခဲစက် (vapor compression refrigeration ice plant) တစ်ခုသည် အမိုးနီးယားဓာတ်ငွေ့ကို အသုံးပြုထားပြီး 150 psia နှင့် 50 psia ကြားတွင် အလုပ်လုပ်နေသည်။ Mass flow rate 3 lb/min နှုန်းဖြင့် လည်ပတ်နေပြီး compressor အထွက် enthalpy သည် 652.8 Btu/lb ရှိပြီး၊ condenser ထဲတွင် 70°F သို့ subcooled လုပ်ခဲ့သည်။ Cp for vapor = 0.7 နှင့် Cp for liquid = 7.15 Btu/lb °R ဟု ယူဆလျက် (က) cooling capacity (ton) ၊ (ခ) C.O.P တို့ကိုရှာပါ။

(၁၃) ရေခဲစက်တစ်ခုတွင် single acting compressor ကို အသုံးပြု၍ swept volume သည် 9.9 ft^3/min ဖြစ်သည်။ Suction pressure သည် 34.3 psia ဖြစ်သည်။ Discharge pressure သည် 169.2 psia ဖြစ်သည်။ Condenser အထွက် အပူချိန်သည် 68°F ဖြစ်ပြီး အဝင်အပူချိန်သည် 140°F ဖြစ်သည်။ အမိုးနီးယားဖြစ်သည်။ Condenser မှ အပူစွန့်ထုတ်မှု 483 Btu/min နှင့် evaporator မှ အပူစုပ်ယူနှုန်း 356 Btu/min ရှိသည်။ Cp for vapor = 0.7 Btu/ lb °F ယူဆလျက် (က) C.O.P (ခ) mass flow rate (ဂ) cooling capacity in ton (ဃ) evaporator အဝင်နှင့်အထွက် အခြေအနေများကို ရှာပါ။

(၁၄) Single acting single cylinder အသုံးပြုနေသော ရေခဲစက်တစ်ခုတွင် Bore = 3.75 inch နှင့် stroke = 4 inch နှင့် 400 rpm ဖြင့် လည်ပတ်နေသည်။ ဓာတ်ငွေ့မှာ အမိုးနီးယားဖြစ်ပြီး၊ 160 psia နှင့် 50 psia ကြားတွင် အလုပ်လုပ်နေသည်။ Condenser အဝင်အပူချိန်သည် 150°F ဖြစ်ပြီး အထွက်အပူချိန်သည် 70°F ဖြစ်သည်။ Condenser cooling water သည် 56°F ဖြင့် ဝင်ရောက်ပြီး 70.5°F တွင် ပြန်ထွက်သွားသည်။ ရေလှည့်ပတ်နှုန်းမှာ 1.42 Gal/min ရှိသည်။ Evaporator မှ 60°F ရှိသော ရေသန့်အဖြစ် 62 lb/hr နှုန်းထုတ်ပေးနေသည်။ Cp for liquid = 1.15 နှင့် Cp for vapor = 0.62 Btu/lb°F ဟု ယူဆ၍ (က) ton of refrigeration ၊ (ခ) C.O.P ၊ (ဂ) mass flow rate lb/min ၊ (ဃ) evaporator အဝင်နှင့်အထွက် ဓာတ်ငွေ့အခြေအနေများ ကို ရှာပါ။

(၁၅) Food freezing system တစ်ခုတွင် 20 ton of refrigeration အသုံးပြုနေပြီး၊ evaporator temperature

သည် 40°F ဖြစ်ပြီး condenser temperature သည် 72°F ရှိကာ R-22 ကို အသုံးပြုနေသည်။ Condenser မှ အထွက်တွင် 7°F sub cooled ဖြစ်ပြီး၊ evaporator အထွက်တွင် 6°F superheating ဖြစ်သည်။ Compression ပြုလုပ်စဉ် adiabatic process ဖြစ်ပြီး၊ cylinder အရေအတွက်(၆)ခု ပါဝင်ကာ Bore = Stroke ဖြစ်သည်။

RPM 1500 ဖြင့် လည်ပတ်နေလျှင်

(၁) Refrigeration effect,

(၂) Mass flow rate,

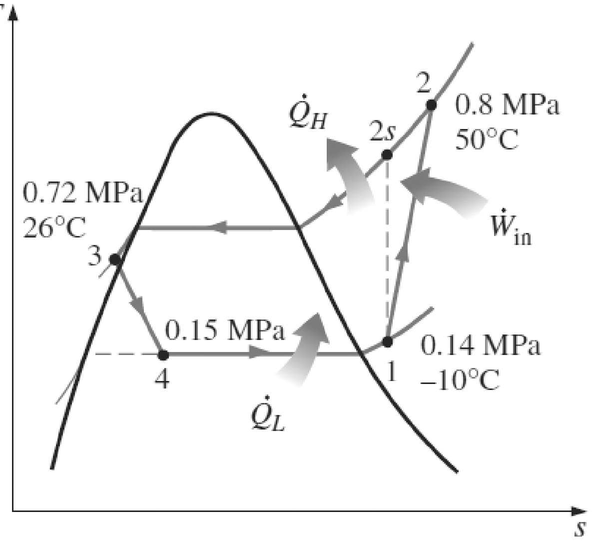
(၃) Volume flow rate

(၄) H P required

(၅) Heat rejected in condenser,

(၆) Bore and stroke of compressor တို့ကိုရှာပါ။

(၁၆) Refrigerator တစ်ခု၏ compressor အတွင်းသို့ R-134a သည် ဖိအား 140 kPa နှင့် အပူချိန် -10°C ဖြင့် ဝင်ရောက်လာသည်။ Refrigerant R-134a စီးနှုန်းသည် 0.2 m3/min ဖြစ်ပြီး compressor မှ ဖိအား 1 MPa ဖြင့် ထွက်သွားသည်။ Compressor ၏ isentropic efficiency သည် 78 percent ဖြစ်သည်။ Throttling valve အတွင်းသို့ ဖိအား 0.95 MPa နှင့် အပူချိန် 30°C ဝင်ရောက်ပြီး၊ evaporator အတွင်းမှ saturated vapor –18.5°C ဖြင့် ထွက်ခွာသွားသည်။



T-s diagram

အထက်ပါပုံတွင် refrigeration cycle ကို T-s diagram ဖြင့် ဖော်ပြထားသည်။ အောက်ပါတို့ကို ရှာပါ။

(၁) Compressor သို့ ထည့်ပေးရမည့် စွမ်းအား(power input)

(၂) Refrigerated space မှ အပူစွန့်ထုတ်နှုန်း(rate of heat removal) နှင့်

(၃) Evaporator နှင့် compressor အကြားတွင် ဖြစ်ပေါ်သော pressure drop နှင့် rate of heat gain ကို ရှာပါ။

- End -