

KESKLAVOR
Eesti Keskkonnauuringute Keskus

CENTRAL LAB
Estonian Environmental Research Centre

Külmatehnika tehniline juhend: OKA-de ja F-gaaside alternatiivid



Tallinn 2016



Sisukord

1. Eessõna	3
2. Seadusandlus	4
3. Ohutusklassid.....	7
4. Alternatiivsed külmaained.....	10
4.1. Süsinikdioksiid.....	10
4.1.1. Põhiomadused	10
4.1.2. Kasutusvaldkonnad	16
4.1.3. R744 tüüpilised süsteemid	17
4.1.4. R744-süsteemide hooldus	30
4.2. Ammoniaak	39
4.2.1. Põhiomadused.....	39
4.2.2. Kasutusvaldkonnad	41
4.2.3. NH ₃ tüüpilised süsteemid.....	41
4.2.4. R717-süsteemi hooldus	46
4.3. Süsivesinikud	48
4.3.1. Põhiomadused	48
4.3.2. Kasutusvaldkonnad	51
4.3.3. HC-süsteemide hooldus	51
LISA 1. R744 p-h diagramm	54
LISA 2. R744-süsteemide rakendus p-h-diagrammi näitel.....	55



1. Eessõna

Kyoto protokolliga raames võttis Euroopa Liit endale kohustuse vähendada aastaks 2050 kasvuhoonegaaside (KHG) heitkoguseid 80–95% võrra 1990. aasta tasemest, et piirata üleilmset kliimamuutust nii, et temperatuur ei tõuseks rohkem kui 2 °C, ja hoida seega ära soovimatut mõju kliimale. Kyoto protokoll hõlmab muu hulgas ka kolme fluoritud kasvuhoonegaasi (edaspidi F-gaase), milleks on fluorosüsivesinikud (edaspidi HFC-d), perfluorosüsivesinikud (edaspidi PFC-d) ja väävelheksafluoriid (edaspidi SF₆). Enamikul nendest gaasidest on suur globaalset soojenemist põhjustav potentsiaal (edaspidi GWP).

F-gaaside heitkoguste vähendamiseks, Euroopa Liidu kliimamuutuste eesmärkide ning Kyoto protokolliga kohustuste täitmiseks võtsid Euroopa Parlament ja nõukogu 16. aprillil 2014. a vastu määruse (EL) nr 517/2014 F-gaaside kohta ja määruse (EÜ) nr 842/2006 kehtetuks tunnistamise kohta. See määrus kehtestab spetsiifilised nõuded F-gaaside olelustersüklil erinevate etappide jaoks alates tootmisest kuni kasutuse lõpuni. Seega mõjutab määrus erinevaid sihtgrupe, kaasa arvatud F-gaaside tootjaid, importijaid ja eksportijaid, teatavaid F-gaase sisaldavate toodete ja seadmete tootjaid ning seadmete käitajaid.

Samuti on määramises sätestatud HFC-de kasutamise järkjärguline vähendamine. Selline HFC-de kasutamise järkjärguline vähendamine tähendab, et HFC-sid, eriti suure GWP-ga HFC-sid, kasutatakse edaspidi palju harvemini. Seetõttu on käitajatel põhjust investeerida seadmetesse, milles kasutatavatel gaasidel on võimalikult väike mõju ülemaailmsele soojenemisele, seega seadmetesse, kus kasutatakse süsivesinikke, ammoniaaki või süsinikdioksiidi.

Käesolev dokument on mõeldud abimaterjalina kursustel, kus käsitletakse F-gaase sisaldavate külma- ja kliimaseadmete ning soojuspumpade ja neis sisalduvate gaaside mõju keskkonnale.

Keskkonnainvesteeringute Keskus

Eesti Keskkonnaministeerium

Eesti Keskkonnauuringute Keskus

TTÜ Eesti Mereakadeemia



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
EESTI MEREAKADEEMIA



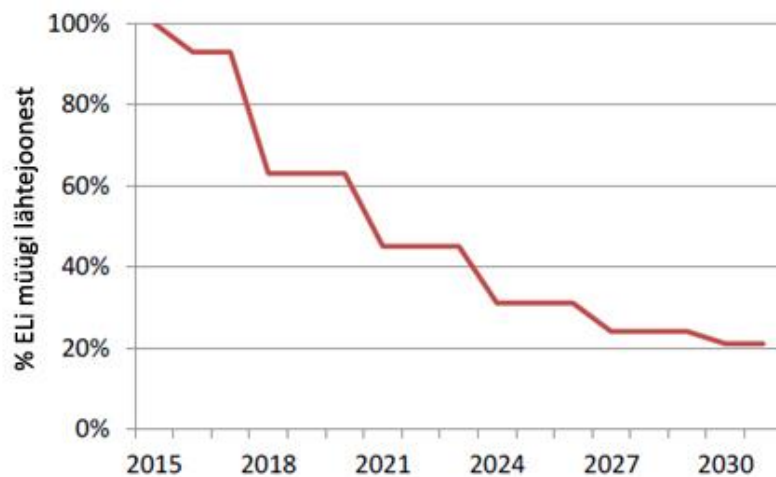
KESKKONNAMINISTEERIUM

2. Seadusandlus

Määrus (EL) nr 517/2014 (edaspidi „määrus”) sisaldab mitmesuguseid nõudeid selliste seadmete hooldustehnikutele ja käitajatele, mis sisaldavad F-gaase, nt HFC-d.

Samuti on määruses sätestatud nn HFC-de kasutamise järkjärguline vähendamine, mis tähendab ELis turulelastavate HFC-de (väljendatud CO₂ ekvivalendina) vähendamist 79% võrra ajavahemikul 2015–2030. See mehhanism ei keelusta ühtegi konkreetset HFC-d. Kuna kättesaadavad CO₂ ekvivalentkogused aja jooksul vähenevad, võib oodata hinnatõusu, eriti HFC-de puhul, mille GWP on suur (suure CO₂ ekvivalendi kasutusega). Hinnatõus on käitajate jaoks oluline, kui nad kavandavad HFC-sid sisaldavate seadmete ja süsteemide hooldus- ja teenindustöid.

Käitajad võivad edaspidigi kasutada olemasolevate külmutusainetega jahutus- ja kliimaseadmeid ning soojustumpasid, v.a teeninduskeeld (vt allpool). Hinnatõus võib aga olla märkimisväärne eriti siis, kui F-gaaside koguseid järgnevatel aastatel vähendatakse (vt Joonis 1. ja Tabel 1.). On oluline mõista, et esialgu on muutus üsna suur (st, et varustamist vähendatakse kiiresti).



Joonis 1. F-gaaside järkjärguline vähendamine 517/2014 määruse alusel

Tabel 1. F-gaaside järkjärgulise vähendamise etapid 2030. aastani

2009– 2012	2015	2016– 2017	2018– 2020	2021– 2023	2024– 2026	2027– 2029	2030
Lähtejoon: 100 %	100 %	93 %	63 %	45 %	31 %	24 %	21 %

Uute seadmete ostmisel peaksid käitajad teadma, millised piirangud kehtivad teatavate F-gaaside kasutamise suhtes uutes seadmetes. 2020. aastast on keelatud täita teatavaid külmutusseadmeid uue (kasutamata) F-gaasiga, millel on väga suur mõju globaalsele soojenemisele.

Seetõttu on uusi seadmeid osta kavatsevatele käitajatele oluline neid asjaolusid arvesse võtta. Praegu ei ole soovitatav investeerida suure GWPga HFC-d kasutavatesse seadmetesse, mille kohta kehtib teeninduskeeld (vt allpool). Käitajad peaksid küsima nõu, millised väikese GWPga külmutusagensse vajavad seadmed või muud tehnilised lahendused on nende konkreetsete olude jaoks sobivad.

Tabel 2. Uute seadmetega seotud keelud, mis on kehtestatud 517/2014 määruses

Keelu kirjeldus		Keelu kuupäev
Fluorosüivesinikke GWPga 150 või üle selle sisaldavad kodumajapidamistes kasutatavad külmikud ja sügavkülmikud		1. jaanuar 2015
Ärilisel eesmärgil kasutuseks mõeldud külmikud ja sügavkülmikud (hermeetiliselt suletud süsteemid)	mis sisaldavad fluorosüivesinikke GWPga 2500 või üle selle	1. jaanuar 2020
	mis sisaldavad fluorosüivesinikke GWPga 150 või üle selle	1. jaanuar 2022
Paiksed jahutusseadmed, mis sisaldavad või mille käitamiseks on vaja fluorosüivesinikke GWPga 2500 või üle selle, v.a seadmed, mille eesmärk on jahutada tooteid temperatuurini alla $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$		1. jaanuar 2020
Ärilisel eesmärgil kasutamiseks mõeldud kahe või enama kompressoriga külmutusagregaadid, mille nimivõimsus on 40 kW või enam ja mis sisaldavad või mille käitamiseks on vaja fluoritud kasvuhoonegaase, mille GWP on 150 või enam, välja arvatud kaskaadsüsteemi primaarses külmasüsteemis, kus võib kasutada fluoritud kasvuhoonegaase, mille GWP peab jääma alla 1500		1. jaanuar 2022
Teisaldatavad siseruumides kasutatavad kliimaseadmed (hermeetiliselt suletud seadmed, mida lõppkasutaja saab ühest ruumist teise viia), mis sisaldavad fluorosüivesinikke GWPga 150 või enam		1. jaanuar 2020
Alla 3 kg fluoritud kasvuhoonegaase sisaldavad ühe siseosaga kliimaseadmed, mis sisaldavad või mille käitamiseks on vaja fluoritud kasvuhoonegaase, mille GWP on 750 või enam		1. jaanuar 2025

Eeltoodust ei saa järeldada, et nimetatud keelud tähendavad, et asjaomaseid külmutusagenseid on kuni keeldude jõustumiskuupäevani soovitatav kasutuses hoida. Järkjärguline vähendamine mõjutab tugevasti nende gaaside tarneid ja hinnaarengut juba enne keeldude jõustumiskuupäevi (vt eespool). Seega ei tarvitse gaaside kasutamise jätkamine olla majanduslikult otstarbekas. Selle asemel on soovitatav võtta neid keelde kui teatavaid suuniseid selle kohta, millises järjekorras toimub eri külmutusagensite väljavahetamine vähese kliimamõjuga alternatiivide vastu juba enne keelu tegelikku jõustumiskuupäeva. Järgmises tabelis on välja toodud Eestis enamlevinud F-gaaside GWP väärtused.

Tabel 3. Eestis enamlevinud F-gaaside GWP väärtused¹

Külmaine	GWP
R134a	1430
R402a	2788
R404a	3922
R407c	1774
R410a	2088
R417a	2346
R422a	3143
R422d	2729
R507a	3985

Sõidukite kliimaseadmete direktiiviga on juba praegu ette nähtud, et ajavahemikul 2011–2017 tuleb uute automodelite teisaldatavates kliimaseadmetes kasutusele võtta külmutusagens, mille GWP-väärtus on väiksem kui 150. 2017. aastast alates kehtib see kõigi uute sõiduautode ja kergeveokite suhtes. F-gaaside määrusega ei ole teisaldatavate kliimaseadmete kohta muid keelde kehtestatud.

¹ 2014. aasta seisuga

3. Ohutusklassid

Ohutuse teema on muutunud olulisemaks nüüd, kui turule on tulnud tuleohtlikud, tavapära osoonikihti kahandavatest külmaainetest toksilisemad ja/või oluliselt suuremal rõhul toimivad külmaained või alternatiivsed mittepõlevad HFC-külmaaineid, millel on potentsiaali muutuda laialdaselt kasutatavateks. Seetõttu pööratakse nüüd senisest rohkem tähelepanu ohutusstandardite ja -eeskirjade sätestatud nõuetele.

Külmaainete ohutusklassid

Kõige laialdasemalt on kasutusel ÜRO ainete klassifikatsioon, kus nn ohtlikele ainetele määratakse klassifikatsioon nendega seotud põhiehtude põhjal.

Jahutus- ja kliimaseadmete tööstuses kasutatakse teistsugust klassifitseerimismeetodit, kus enamikule külmaainetele määratakse ohutusklass nende toksilisuse ja tuleohtlikkuse järgi. Klassifitseerimise meetod on sätestatud standardis ISO 817 ja standardi EN 378 projektis.

Toksilisuse klassifikatsioon põhineb asjaolul, kas toksilisust on täheldatud või mitte kontsentratsioonil alla 400 ppm ruumalaühiku kohta, tuginedes andmetele, mida kasutatakse läve piirväärtuse, vaatlusperioodi kaalutud keskmise (TLV-TWA²) määramiseks, või püsivatele näitajatele. Toksilisuse klasse on kaks:

- klass A: külmaained, mille puhul ei ole täheldatud toksilisust kontsentratsioonil alla 400 ppm³ ruumalaühiku kohta;
- klass B: külmaained, mille puhul on täheldatud toksilisust kontsentratsioonil alla 400 ppm ruumalaühiku kohta.

Tuleohtlikkuse klassifikatsioon oleneb sellest, kas ainet saab standardiseeritud katsetes süüdata, ning kui saab, siis mis on madalama süttimisohtliku kontsentratsiooni (LFL⁴) ja põlemissoojuse väärtus. Tuleohtlikkus jaotatakse kolme klassi (väärtused standardi ISO 817 järgi):

- klass 1: külmaained, mis ei näita tuleohtlikkust testimisel õhus temperatuuril 60 °C ja tavapärase õhurõhu juures;
- klass 2L: sama mis klass 2, kuid (laminaarne) põlemiskiirus on alla 0,10 m/s;
- klass 2: külmaained, mis näitavad tuleohtlikkust testimisel temperatuuril 60 °C ja õhurõhu korral, kuid mille madalaim süttimisohtlik kontsentratsioon LFL on üle 3,5% mahuprotsendist ja mille põlemissoojus on alla 19 000 kJ/kg;
- klass 3: külmaained, mis näitavad tuleohtlikkust testimisel temperatuuril 60 °C ja õhurõhu korral, kuid mille madalaim süttimisohtlik kontsentratsioon LFL on 3,5%

² TLV-TWA - *threshold limit value – time weighted average*

³ ppm – *parts per million* näitab lahustunud aine massiosade arvu miljonis massiosas lahuses.

⁴ LFL - *lower flammability limit*



mahuprotsendist või alla selle ning mille põlemissoojus on 19 000 kJ/kg või suurem.

Klass 2L kuulub standarditesse ISO 817 ja ISO 5149 ning on tehtud ettepanek kaasata see ka standardisse EN 378. Selle peamine eesmärk on eristada HFC-152a-d ja teisi klassi 2 kuuluvaid külmaaineid (nagu R-717, HFC-32 ja HFC-1234yf), mis on üldjuhul vähem tuleohtlikud ja mille puhul on vähem tõenäoline ülerõhu tekkimise oht, mis võiks põhjustada kahjustusi.

Üldjuhul, mida kõrgem on klassifikatsioon, st toksilisuse klass B võrreldes klassiga A ja tuleohtlikkuse klass 3 võrreldes klassiga 1, seda keerukamad on projekteerimismõuded külmaainest tulenevate ohtude haldamiseks.

Madalaim süttimisohtlik kontsentratsioon

Üldjuhul väljendab tuleohtliku külmaaine madalaim süttimisohtlik kontsentratsioon (LFL) ruumi või suletud alale vabastatava külmaaine minimaalset kogust, mis aktiivse süttimisallika olemasolu korral võib süttida.

Akuutse toksilisuse piirväärtus

Mistahes külmaaine akuutse toksilisuse piirväärtus väljendab ruumi või suletud alale vabastatava külmaaine minimaalset kogust, mis võib seal viibijatele põhjustada kahjulikku toksikoloogilist mõju.

Praktiline piirväärtus

Külmaainete kasutamisele kohaldub veel üks ohutusnõue, mida esitatakse praktilise kontsentratsiooni piirväärtusena (PL⁵). See väljendab hõivatud ruumis olevat kõrgeimat kontsentratsioonitaset, mis ei põhjusta evakueerumisel tekkida võivaid kahjulikke (nt akuutseid) mõjusid. Põhimõtteliselt on see külmaaine madalaim „ohtlik” kontsentratsioon, millele on kohaldatud ohutegur. Praktilise piirväärtuse arvutuse aluseks on:

- akuutse toksilisuse piirväärtus (ATEL⁶), mis on tuletatud suremuse (väljendatuna surmavas kontsentratsioonis LC50) ja/või südameveresoonkonna sensibiliseerimise, ja/või tuimestava mõju või kesknärvisüsteemi mõjude põhjal;
- osoonikihti kahandav piirväärtus (ODL⁷);
- 20% madalaimast süttimisohtlikust kontsentratsioonist.

Kui klassi A1 (ja A2L) ning klassi B kuuluvate külmaainete praktiline piirväärtus arvutatakse üldjuhul akuutse toksilisuse piirväärtuse põhjal, siis klassi A2 ja A3 kuuluvate külmaainete puhul on tavaliselt määravaks teguriks madalaim süttimisohtlik kontsentratsioon. Mõnede külmaainete puhul määratakse praktiline piirväärtus kasutuskogemuste põhjal.

⁵ PL – *practical limit*

⁶ ATEL - *acute toxicity exposure limit*

⁷ ODL - *oxygen deprivation limit*



Erinevalt traditsioonilistest külmaainetest iseloomustavad enamikku väikese GWP-ga külmaaineid suuremat tähelepanu nõudvad ohutegurid, nagu tuleohtlikkus, toksilisus ja suurem tööõhk. Ohutusstandardites (ja tööstusesisestes tegevusjuhendites) on sätestatud juhised ainete rohkem kahjulikest omadustest tulenevate ohtude minimeerimiseks.

4. Alternatiivsed külmaained

Eristatakse keskkonnas loomulikult olemasolevaid looduslikke külmaaineid ja inimeste loodud mittelooduslikke ehk sünteetilisi külmaaineid, mida looduses loomulikult ei esine. Mõnikord seatakse mõiste „looduslikud külmaained” täpsus kahtluse alla, kuivõrd nende kasutamiseks külmaainena läbivad ka ammoniaak, süsinikdioksiid ja süsivesinikud tööstusliku puhastus- ja tootmisprotsessi.

Kuid tänapäeval eristatakse kindlalt aineid, mille keemilisi omadusi ja ohutustegureid on komplekselt uuritud, ning neid F-gaase, millel on nende keemilise kompleksuse või suhteliselt lühikese kasutusea tõttu tõestatud ja/või teadmata kahjulik mõju osoonikihi vähenemisele, globaalsele soojenemisele ja keskkonnaohutusele ning on seetõttu jätkuva arutelu objektiks.

Täna kasutatavatest looduslikest külmaainetest on enam levinud ammoniaak (NH_3 , R717), süsinikdioksiid (CO_2 , R744) ja süsivesinikud (HCs), nagu propaan (R290), isobutaan (R600a) ja propüleen, mida nimetatakse ka propeeniks (R1270).

Püüdluse tõttu minimeerida osoonikihi kahanemist ja kliima soojenemist, on hiljuti tõusnud huviorbiiti sellised alternatiivsed ja looduslikud külmaained nagu ammoniaak, süsivesinikud, glükool ja süsinikdioksiid.

4.1. Süsinikdioksiid

Süsinikdioksiidi (CO_2) ehk R744 vaadeldakse kui elujõulist alternatiivi HFC-dele madalatemperatuurilises rakenduses kaubanduse külmutusseadmetes, kuna see ei ole toksiline (ventileeritud alal) ega tuleohtlik, on aine ohutushinnang kõrge. Nii nagu HFC-d ei põhjusta ka see osoonikihi kahanemist. CO_2 GWP väärtus on võrdne ühega ja see on soodne alternatiiv HFC- või süsivesinikepõhistele külmaainetele. Tänu oma füüsikalistele omadustele ja suurele külmatootlikkusele on CO_2 -tehnoloogia loomulik valik elujõulise alternatiivina kõikidesse jahutusprotsessidesse.

4.1.1. Põhiomadused

Kui arvestada ainult termodünaamilisi omadusi, ei sobi CO_2 väga hästi külmaaineks. Kuid sellegipoolest on CO_2 -l mitu ainulaadset termofüüsikalist omadust:

- väga hea soojuslähikandetegur;
- suhteliselt vähetundlik rõhu kaole;
- väga madal viskoossus.

Praktilises töös tagavad CO_2 -süsteemid väga suure jõudluse, seda suuresti tänu paremale soojusvahetuspotentsiaalile, väga madala võimsusega pumpamisele, kui CO_2 kasutatakse sekundaarse vedelikuna ja külmaades kliimatingimustes töötab väga väikese kondenseerumisrõhuga.



Võrreldes teiste külmaainetega oleneb CO₂-süsteemide efektiivsus rohkem kasutusvaldkonnast ja kliimatingimustest. Kõikide külmaainete puhul väheneb süsteemi efektiivsus, kui kondenseerumistemperatuur tõuseb. CO₂ on üks nendest külmaainetest, mille efektiivsus väheneb kõige rohkem. CO₂ head termofüüsikalised omadused võivad seda mingil määral kompenseerida, kuid mitte lõputult.

CO₂-l on kõrge soojusmahtuvus kõrgetel temperatuuridel, ja kui seda soojust saab taaskasutada pesemis- või tehnilise vee soojendamiseks või sarnaseks otstarbeks, muutub kogu süsteem väga efektiivseks.

Rõhk ja temperatuur

CO₂ on kõrgrõhu külmaaine, mis vajab efektiivseks toimimiseks suurt töö rõhku. Ooterežiimil võib ümbritsev temperatuur tõusta kriitilise temperatuurini ja isegi ületada seda ning rõhk võib ületada kriitilise punkti väärtuse. Sellepärast projekteeritakse süsteemid üldjuhul nii, et need taluvad rõhku kuni 90 bar, või mõnikord varustatakse süsteem isegi väikese iseseisva kondenseerimisseadmega, mis hoiab rõhku madalal. Samas on CO₂-l madal kompressioonirõhu suhe (20 kuni 50% väiksem kui HFC-del ja ammoniaagil), mis suurendab selle mahtvuslikku efektiivsust. Tänu aurustumistemperatuurile alates –55 °C kuni 0 °C on CO₂ mahtvuslik efektiivsus näiteks neli kuni kaksteist korda parem kui ammoniaagil, mis võimaldab kasutada väiksema võimsusega kompressoreid.

CO₂ kolmikpunkt ja kriitiline punkt on väga lähedal töövahemikule. Kriitilise punkti võib saavutada süsteemi tavaekspluatatsiooni juures. Süsteemi hooldamise ajal võib süsinikdioksiid saavutada kolmikpunkti, mis väljendub kuiva jää tekkimises, kui süsteemi vedelikku sisaldavad osad satuvad õhurõhu mõju alla. Kuiva jää tekkimise vältimiseks hoolduse käigus tuleb tuulutamise ajal võtta spetsiaalsed meetmed.

Materjalide koostõju

CO₂ ei reageeri tavaliste metallide või Teflon®-i, PEEK-i või neopreeni komponentidega. Kuid see hajub elastomeeridesse ja võib kokkupuutel butüülkummi (IIR), nitriilkummi (NBR) ja etüleen-propüleeniga (EPDM) põhjustada paisumise.

Kuna vedelolekus CO₂ tihedus on umbes 1,5 korda suurem kui ammoniaagil, tulemuseks on suurem täitekogus aurustites, näiteks suurtes plaatjahutites suurtes tööstuslikes süsteemides. Suurem tihedus tähendab samas ka suuremat õliringlust, mis omakorda tingib efektiivsete õliseparaatorite kasutamise vajaduse tööstuslikes süsteemides.

Efektiivsus

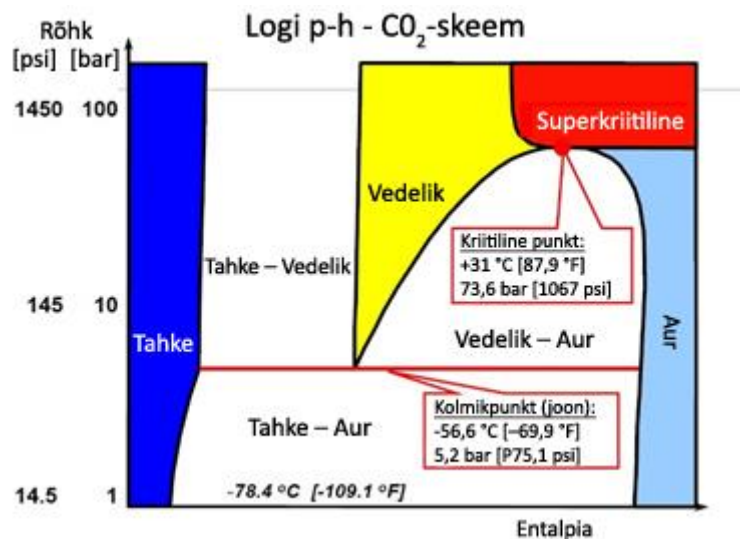
Kuna CO₂ tekib kõrvalsaadusena paljudes tööstusharudes, CO₂ on hind madal. Kuid kõrgema rõhu (transkriitilistes süsteemides) või suurema keerukuse (nii transkriitilistes kui ka subkriitilistes süsteemides) tõttu kipuvad CO₂-süsteemid olema traditsioonilistest

süsteemidest kallimad. Näib, et seoses booster süsteemide kasutuselevõtuga väheneb süsteemide keerukus ja kuna CO₂ paigaldiste arv on suurenenud, siis näitab ajalugu, et nende maksumus on lähenemas võrreldavate HFC-süsteemide maksumusele.

Teiseks võib suurte CO₂-süsteemide, eriti just tööstuslike külmutusseadmete, rajamine olla vähem kulukas võrreldes glükoolipõhiste seadmetega, mille tulemusel võivad esmased kulud ja olelutsükli kulud olla väiksemad.

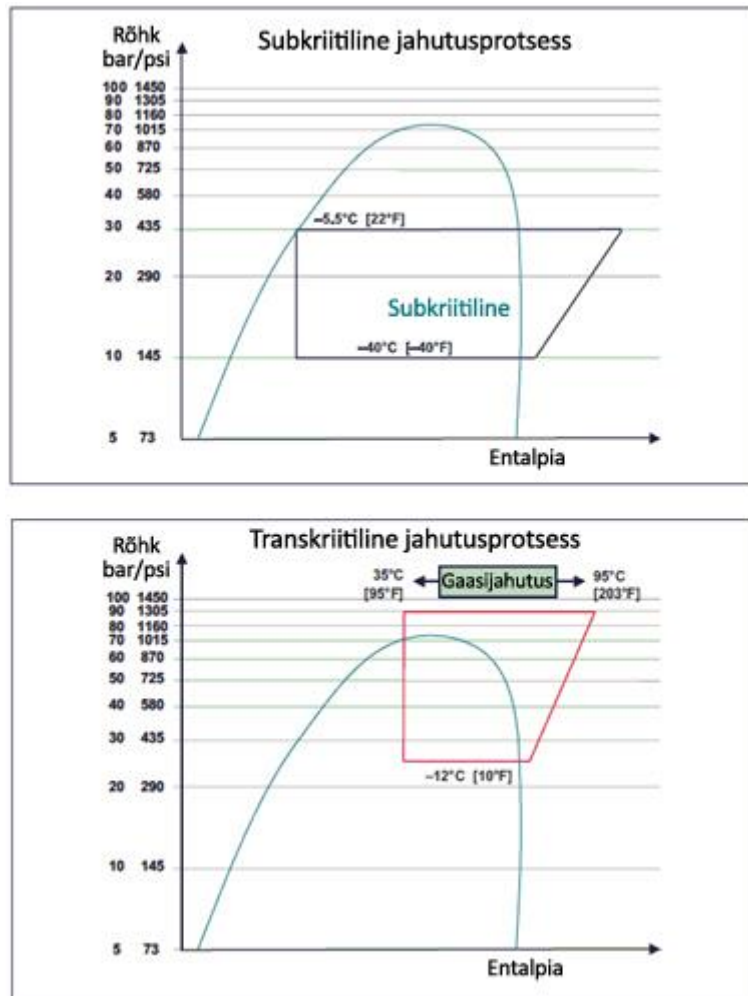
CO₂ kui külmaaine

CO₂ sobib kasutamiseks külmaainena mitmes erinevat tüüpi süsteemis, sh nii subkriitilistes kui ka transkriitilistes. Olenemata CO₂-süsteemi tüübist tuleb arvestada nii kriitilise punkti kui ka kolmikpunktiga.



Joonis 2. CO₂ p-h diagramm

Klassikaline jahutussükkel on subkriitiline, st temperatuuride ja rõhkude kogu vahemik on alla kriitilise punkti ja üle kolmikpunkti. Üheastmeline subkriitiline CO₂-süsteem on lihtne, kuid sellel on ka oma miinused, mis tulenevad selle piiratud temperatuurivahemikust ja kõrgest rõhust (vt ka LISA 1).



Joonis 3. Sub- ja transkriitiline jahutusprotsess p-h diagrammil

Tänapäeval kasutatakse transkriitilisi CO₂-süsteeme ainult väikestes ja kaubanduslikes süsteemides, nt mobiilsetes kliimaseadmetes, väikestes soojuspumpades ja supermarketite külmutusseadmetes ning need ei sobi kasutamiseks tööstuslikes süsteemides (vt ka LISA 2).

Subkriitilistes tsüklites on töö rõhud tavaliselt vahemikus 5,7 kuni 35 bar [83 kuni 507 psi], mis vastab temperatuurile -55 kuni 0 °C [-67 kuni 32 °F]. Kui aurustid sulavad kuuma gaasi mõjul üles, on töö rõhk umbes 10 bar [145 psi] kõrgem (vt ka LISA 2).

Kõige sagedamini kasutatakse CO₂-kaskaadsüsteemina tööstuslikes külmutussüsteemides, sest selle rõhku saab piirata nii palju, et on võimalik kasutada kaubanduslike külmutussüsteemide komponente, nagu kompressoriid, juhtimissüsteemid ja ventiilid.

CO₂-kaskaadsüsteemide projekteerimiseks on mitu erinevat võimalust, näiteks otseaurustumisega süsteem, pumbaga ringlussüsteem või CO₂ sekundaarse soolvee kontuuriga süsteem või nende kombinatsioon.



Gaasjahuti on selline osa transkriitilises süsteemis, mis erineb kõige rohkem süsteemist, milles kasutatakse traditsioonilisi külmaaineid. See asendab traditsioonilistes külmutusseadmetes kasutatavat kondensaatorit.

Kui temperatuur on üle 31 °C, siis ei suuda CO₂ jahutada. Seetõttu ei ole rõhk ja temperatuur soojuse ülekandeprotsessis enam teineteisest sõltumatud.

Transkriitilise CO₂ puhul on väiksem temperatuurierinevus mitte väljundil, vaid olenevalt rõhu ja temperatuuri seadistustest sageli keskel, gaasjahuti sisendi ja väljundi vahel. Seetõttu võimaldab CO₂ kasutamine saavutada väga kõrgeid temperatuure. Gaasjahuti potentsiaali maksimaalseks kasutamiseks on oluline konfigureerida see vastuvoolu-soojusvahetina. Üldjuhul on õhu ja CO₂ jahutuskeskkonna temperatuurierinevus gaasjahutis pool sellest väärtusest, mis on normaalne tüüpilise kondenseerumise jaoks.

Tabel 4. R744 eelised ja puudused

Eelised	Puudused
<ul style="list-style-type: none"> • Suur külmutusvõimsus tänu suurele külmatootlikkusele (mis on umbes viis korda suurem kui R404A-l). Sellel on positiivne mõju kompressori mahutavusele ning soojusvahetite võimsusele ja torustiku läbimõõdule. • Väiksem rõhu langus torustikus ja soojusvahetites. Näiteks pikkadest vaakum- ja vedelikutorudest tulenev mõju on väiksem. • Väga hea soojusülekandegur aurustites ja kondensaatorites tänu suurele rõhule ja tihedusele. See tagab, kas väiksema temperatuurierinevuse külmaaine ja õhu vahel, parandades seeläbi efektiivsust, või võimaldab kasutada väiksema võimsusega aurusteid ja kondensaatoreid. Vastupidavuse tagamiseks suurele rõhule võib osutada vajalikuks suurendada toru seinapaksust, mis tähendab, et süsteemi projekt peab olema hästi läbi 	<ul style="list-style-type: none"> • Töötamisel kõrgrõhul ja ooterežiimil on ohtlikumad ja suurendavad lekkevõimalust. Tuleb kasutada spetsiaalse konstruktsiooniga komponente. • Suure külmatootlikkuse tõttu tuleb kasutada spetsiaalseid kompressoreid (teistsuguse mootori ja võimsuse suhtega). • R744-süsteemid on keerukamad, nii kaskaad- kui ka transkriitilised süsteemid. See suurendab komponentide ja paigalduse maksumust. • Torustik peab olema tõenäoliselt valmistatud terasest või roostevabast terasest, vaja on litsentsitud keevitajaid ning suure rõhu ja erinevate materjalide tõttu tuleb kasutada erinevaid ühendamisvõtteid.

<p>mõeldud, et tagada R744 omaduste eeliste kasutamine.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rõhu langus termoreguleerventiilis on suurem kui teiste külmaainete puhul, mis tähendab, et pearõhu minimaalne säte võib olla väiksem. See suurendab efektiivsust. • Väiksem kompressioonisuhe tagab kompressori suurema isoentropse efektiivsuse. • Mittekorrodeeruv enamiku materjalidega. Võrreldes HFC-süsteemidega on materjalide suhtes väga vähe erinevusi. • Hea segunevus kompressori määrdeainetega õli tagastamiseks. Sarnaselt HFC-süsteemidega võib ka siin jätkata polüestri tüüpi määrdeainete kasutamist. • Madal toksilisus ja ei ole tuleohtlik. • Madal GWP, mille mõju kliimamuutusele on väga väike, kui peaks tekkima leke. • Odav toota ja laialdaselt kättesaadav, kuigi kasutamiseks külmutusseadmetes hermeetiliste ja poolhermeetiliste kompressoritega peaks R744 puhtus olema 99,99%, st mõeldud kasutamiseks külmaainena. • Kõrge survetemperatuur suure kompressiooniindeksi tõttu. See tagab hea võimaluse soojuse taaskasutamiseks. Survetemperatuur on eriti kõrge transkriitilistes 	<ul style="list-style-type: none"> • Keerukam konstruktsioon suurendab ka võimalust, et süsteem ei tööta nõuetekohaselt ja on vähem töökindel, eriti kui esmakäitus ei ole korralikult tehtud. • Kui toiduainete külmutamiseks kasutatakse transkriitilisi süsteeme, siis R744 kõrge survetemperatuuri tõttu peavad need olema kaheastmelised. • R744 transkriitilised süsteemid sobivad vähem piirkondadesse, mis on merepinnast kõrgel (nt Kagu-Aasia), kus transkriitilise eksploatatsiooni ebaefektiivsuse tõttu töötab süsteem alati üle kriitilise punkti. • R744 kasutamist ei reguleeri ükski määrus, ka mitte Euroopa F-gaaside määrus, mis tähendab, et selle kasutamist ei jälgita nii tähelepanelikult kui HFC-de kasutamist ja nõuded lekke tuvastamisele ei ole nii karmid. Kuid kõrge rõhu tõttu on süsteem leketele vastuvõtlik, ja kui lekkes on suured, siis süsteemi eksploatatsioon halveneb. • R744-süsteemid on väga tundlikud vee saastumise suhtes ja võivad moodustada ebaharilikke ühendeid, kui soojusvaheti kaskaadis tekib leke.
---	--

<p>süsteemides, kus aurustumise ja soojuse ülekande temperatuurid on väga erinevad.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stabiilne molekul, millest tuleneb väike lagunemispotentsiaal külmutusseadmes. • Puudub kohe vastu võetav seadusandlus, mis piiraks või keelustaks R744 kasutamise, tänu millele saab sellesse suhtuda kui pikaajalise perspektiiviga külmaainesse. 	
--	--

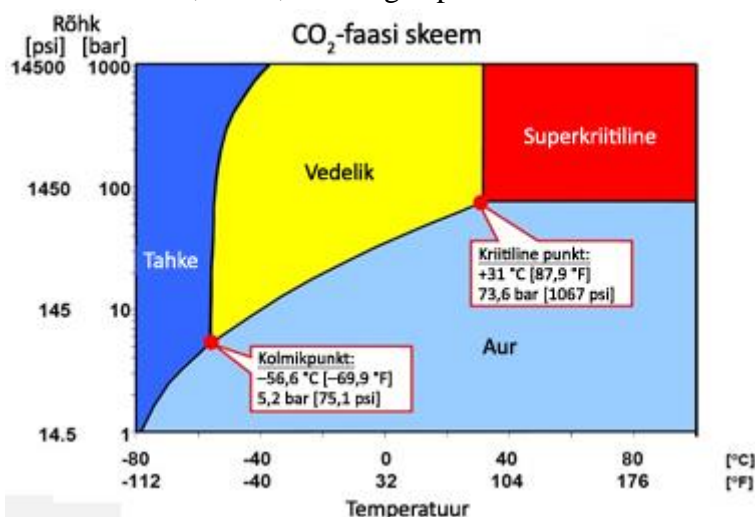
4.1.2. Kasutusvaldkonnad

Kasutatav tehnoloogia oleneb kasutusvaldkonnast ja süsteemi planeeritud asukohast. Mitmes rakenduses on CO₂ atraktiivne ja juba täna laialdaselt kasutatud.

- **Tööstuslik jahutamine.** Üldjuhul kasutatakse CO₂-te koos ammoniaagiga, kas kaskaadsüsteemides või külmakandjana. CO₂ on väga efektiivne kui sekundaarne külmakandja keskmise temperatuuriga süsteemides. Külmaainena on see kõige efektiivsem madalatel temperatuuridel. Kuna sellel on suurepärase soojusülekandeegur ja suur soojusmahtuvus, paljude toodete külmutamiseks on vaja ainult väikest kogust CO₂-te.
- **Kaubanduslikud külmutusseadmed.** Suure GWP-ga külmaainete lekkimine toiduainete jaemüügiks kasutatavates installatsioonides muudab selle sihtmärgiks keskkonnavalastele õigusaktidele. Mittemürgine ja mittetuleohtlik CO₂ sobib hästi sellesse segmenti.
- **Soojuspumbad.** CO₂ on ideaalne lahendus rakendustesse, kus on vaja sooja vett. Transkriitilised CO₂ tsüklid tagastavad suure osa tsüklis tekkivast kuumusest kõrgel temperatuuril. Tänu sellele on CO₂ efektiivne valik süsteemides, kus on vaja nii soojendamist kui ka jahutamist.
- **Transport külmutusseadmed.** See on rakendus, kus külmaaine lekkimine võib ulatuslikult mõjutada keskkonda. Siin võib kasutada mittemürgist ja mittetuleohtlikku CO₂, et vähendada süsiniku üldist jalajälge sektoris.
- **Serverite ja elektrikappide jahutamine.** Elektroonikaseadmete puhul omab kriitilist tähtsust mittetuleohtlikkus ja väga hea soojusülekandeegur väikese negatiivse mõju juures.

CO₂ võib kasutada ka vabajahutuses, kus soojuskandja ringluse tagamiseks on vaja minimaalset võimsust.

Alljärgneval joonisel on kujutatud puhta CO₂ temperatuuri-rõhu-oleku diagrammi. Kõveratevahelised alad määravad temperatuuri ja rõhu piirväärtused, mille raames võivad tekkida erinevad olekud – tahke, vedel, aur ning superkriitiline vedelik.



Joonis 4. CO₂ faasi skeem p-T diagrammil

Nendel kõveratel olevad punktid tähistavad rõhku ja vastavaid temperatuure, mille puhul võivad korraga tekkida kaks erinevat olekut, nt tahke ja aur, vedelik ja aur, tahke ja vedelik. Õhurõhu tingimustes saab CO₂ esineda ainult tahkes või aurustunud olekus. Sellise rõhu juures ei saa moodustuda vedelikku – temperatuuril 78,4 °C [-109,1 °F] on see tahke „kuiv jää”; kui temperatuur tõuseb kõrgemaks, sublimeerib see kohe auruks. Kui rõhk on 5,2 bar [75,1 psi] ja temperatuur on -56,6 °C [-69,9 °F], saavutab CO₂ unikaalse oleku, nn kolmikpunkti. **Kolmikpunkt** on olukord, kus aine on korraga nii tahkes, vedelas kui ka gaasilises olekus.

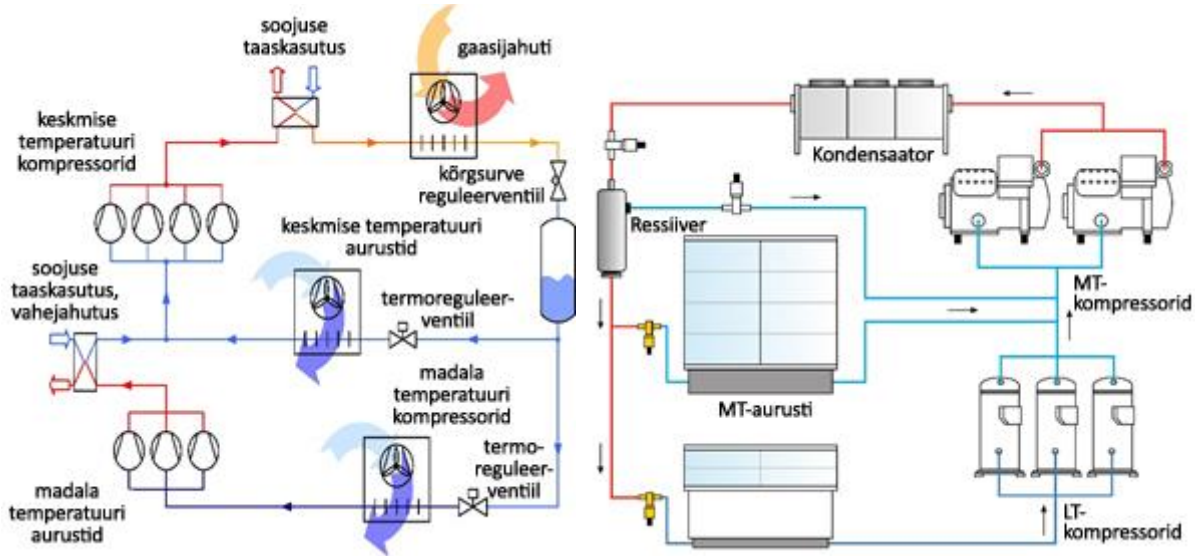
CO₂ saavutab oma kriitilise punkti temperatuuril 31,1 °C [88,0 °F]. **Kriitiline punkt** on olukord, kus vedeliku ja gaasi tihedused on ühesugused. Üle selle punkti ei ole eristuvat vedelikulist ja gaasilist olekut. Sellel temperatuuril on vedelik ja aur ühesuguse tihedusega. Seepärast nende kahe oleku erisused kaovad ja tekib uus – superkriitiline olek.

4.1.3. R744 tüüpilised süsteemid

Erinevalt enamikust külmaainetest kasutatakse CO₂ praktikas kolmes erinevas jahutustsüklis, milleks on:

- subkriitiline (kaskaadsüsteemid);
- transkriitiline (ainult CO₂-põhised süsteemid);
- sekundaarne vedelik (CO₂ kasutatakse kui lenduvat soolvett).

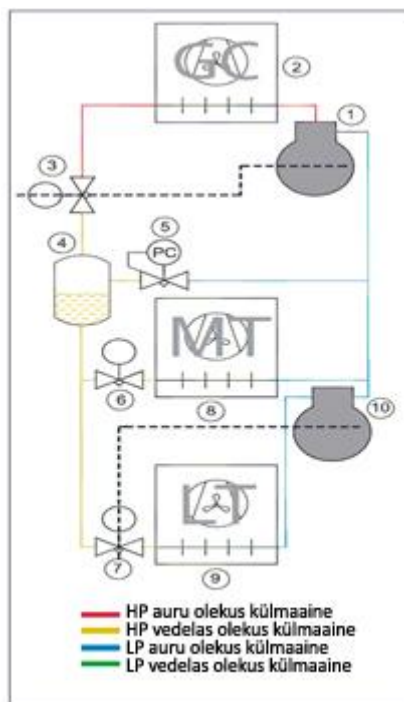
CO₂-booster süsteem otseaurustumisega: süsteemid, millel on kaks temperatuuritaset ning alumise ja keskmise astme kompressorid (vt alumist joonist).



Joonis 5. CO₂-booster süsteem otseaurustumisega

Transkriitiline booster süsteem on üks kõige paljulubavamatest süsteemidest külma kliimaga aladel. Selle põhjuseks on asjaolu, et energiakulu on samal tasemel või parem kui R404a süsteemides ning konstruktsioon on suhteliselt lihtne. Tüüpiline CO₂ transkriitiline booster süsteem jaguneb kolmeks rõhusektsiooniks: kõrgrõhu sektsioon, keskrõhu sektsioon ja madalrõhu sektsioon.

Kõrgrõhu sektsioon algab kõrgrõhu kompressorist (1) ja kulgeb läbi gaasijahuti (2) kõrgrõhu reguleerventiili (3). Selles sektsioonis on kavandatud rõhk tavaliselt vahemikus 90 kuni 120 bar.



Joonis 6. CO₂ transkriitiline booster süsteem

Keskrõhu sektsioon algab kõrgrõhu termoreguleeriventiilist (3), kus külmaaine jaotatakse ressiivris (4) gaasiks ja vedelikuks. Gaas suunatakse ümber kõrgrõhu kompressorite imemisliinile läbi *bypass* klapi (5). Vedelik voolab termoreguleeriventiilidesse (6 ja 7), kus see paisutatakse MT (8) ja LT (9) aurustite ees. LT-aurustis olev gaas surutakse LT-kompressoris (10) kokku ning segatakse MT-aurustis oleva ja *bypass* ventiilist tuleva gaasiga. Seejärel suunatakse gaas HP-kompressori imemistorustikku, kus tsükkel lõpeb.

MT-sektsiooni kavandatud rõhk on enamasti 40–45 bar ja LT-sektsioonis on rõhk 25 bar. Väga sageli projekteeritakse MT- ja LT-sektsioonid ühesuguse rõhu jaoks. Ressiivris olevat rõhku reguleerib astmelise mootoriga ventiil (5). Diferentsiaalrõhu tagamiseks MT termoreguleeriventiilis (6) peab ressiivris olev rõhk olema suurem kui MT-aurustites olev aurustumisrõhk. Teisalt peab rõhk olema kavandatud rõhust madalam.

Juhtseadised

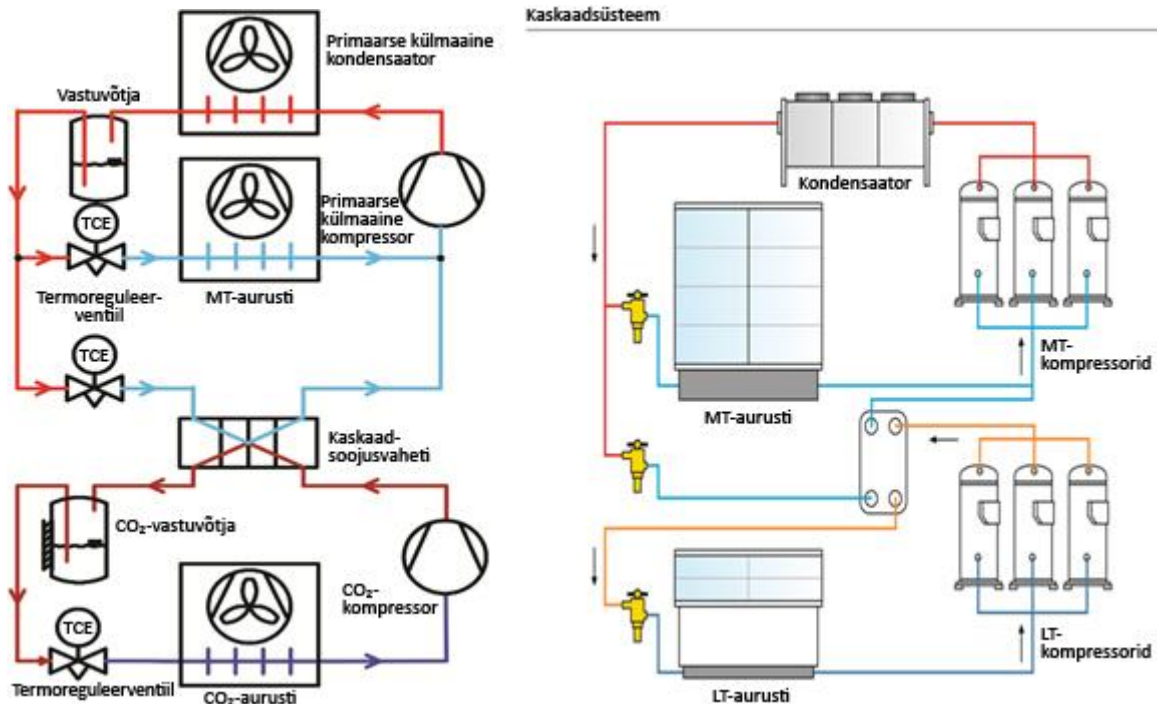
Transkriitilise süsteemi juhtseadised võib jagada nelja rühma: gaasijahuti juhtseadised, ressiivri juhtseadised, sissepitsesüsteemi juhtseadised ja kompressori mahutavuse juhtseadised.

Ressiivri juhtseadised

Rõhu vähendamiseks jaotussüsteemides kasutatakse gaasi *bypass* süsteemi. Pärast kõrgrõhul paisumist gaas ja vedelik eraldatakse ning gaas suunatakse otse kompressori imemistorustikku. Vedelik suunatakse aurustitesse. Tänu sellele saab kasutada standardseid rõhukomponente.

R744-kaskaadsüsteem

R744 on alumise astme külmaaine kaskaadsüsteemis, kus R744 on alati subkriitiline. Kondenseeruva R744 poolt ülekantud soojuse neelab aurustuv ülemise astme külmaaine. Üldjuhul on ülemise astme süsteem traditsiooniline süsteem, milles kasutatakse HFC-d või HC-d ja mida seetõttu nimetatakse hübriidkaskaadsüsteemiks. Mõnes süsteemis kasutatakse R744 nii ülemise kui ka alumise astme külmaainena. Alumises astmes on R744 alati subkriitiline, kuid ülemises astmes on see transkriitiline, kui ümbritsevad tingimused on merepinnast kõrgel.



Joonis 7. CO₂ kaskaadsüsteem

Temperatuurid ja rõhud kaskaadsüsteemides

Keskmine temperatuur kaskaadsüsteemis valitakse temperatuuri järgi, mida on vaja tagada kaupluses olevate vitriinide jaoks, kus kasutatakse kõrgemaid temperatuure. See tähendab, et neid saab jahutada vahetult CO₂-ga. Ka keskmist temperatuuri saab optimeerida suurima energiatõhususe tagamiseks, kui süsteemi kasutatakse ainult madala temperatuuri jaoks.

Kuna tegelikult koosneb kaskaadsüsteem kahest erinevast külmutusseadmest, mis on küll omavahel seotud, kuid kaskaadsoojusvahetis isoleeritud, võib nendes olla erinev kavandatud töörõhk. Üldjuhul põhineb CO₂ kavandatud rõhu komponentide kättesaadavusel ja see võrdub väärtusega 40–45 bar (vastab temperatuurile +5 ... +10 °C). Vältimaks rõhu tõusmist üle eespool nimetatud väärtuste, soovitatakse kasutada ooterežiimil süsteeme. Kaitseventiilid tuleb seada kõrgeimatele sätetele. Ooterežiimil vajaliku rõhu saab saavutada kavandatud rõhu tõstmisega väärtusele 80–90 bar.



Süsteemides, kus väljalastava CO₂ gaasi temperatuur on madal (madal ülekuumendus), võib termoreguleeriventiili ülekuumendamise soojusvaheti võimsuse arvutamise aluseks. Kui CO₂-süsteemis on kõrge ülekuumendus, siis tuleb kasutada aurujahuteid, et vähendada koormust kõrge temperatuuri poolel.

Optimaalne keskmine rõhk CO₂-kaskaadsüsteemides oleneb mitmest parameetrist. Üldjuhul tuleb arvestada kahe erineva olukorraga.

1) Süsteemid, milles on koormus keskmisel temperatuuril

Sel juhul peaks keskmine rõhk olema võimalikult kõrge, et vähendada koormust kõrge temperatuuri etapis. Seetõttu tuleb seada piirangud keskmise astme temperatuurile ja süsteemi nimirõhule.

2) Süsteemid, milles ei ole koormust keskmisel temperatuuril.

Sel juhul peab keskmine temperatuur olema vahemikus $-10 \dots 0$ °C (CO₂ LT kõrge rõhu tõttu), kus alumise piirväärtuse määrab efektiivsuse ja kõrgema süsteemi nimirõhu.

Kaskaadsüsteemi juhtimisseadised

Kaskaadsüsteemide juhtimise saab jaotada järgmiselt:

- kondensaatori tootlikkuse juhtimine;
- kompressori tootlikkuse juhtimine;
- kaskaadsissepritse juhtimine;
- CO₂-voolu juhtimine MT-aurustis;
- sissepritse juhtimine LT-aurustis.

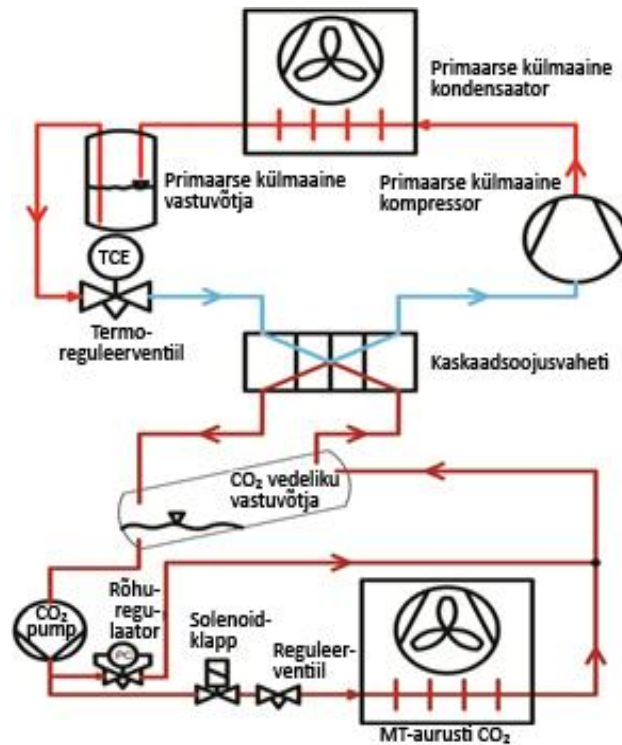
Õlisüsteemi kontroll

Kasutatakse tavaline õlitussüsteem, mis on sarnane tavapäraste külmutusagenside süsteemiga.

Õlitussüsteem koosneb:

- kompressori tasemelülitist ehk õlitase releest;
- õliseparaatori tasemelülitist;
- õliressiivri tasemelülitist;
- õliressiivri rõhuanduritest.

Õli tagastust kompressoritesse hallatakse solenoidklappide aktiveerimisega kasutaja määratud sisse/välja impulsi järjestustega.



Joonis 8. CO₂ sekundaarne süsteem

Sellel skeemil on kujutatud lihtne sekundaarne süsteem. Ülemise astme süsteem jahutab vedelat R744 sekundaarses ahelas. R744 pumbatakse CO₂ ettenähtud pumbaga. See on lenduv, mis tähendab, et erinevalt traditsioonilisest sekundaarsest vedelikust, nagu glükool, ei jää see vedelasse olekusse, vaid aurustub osaliselt. Seetõttu on sellel oluliselt suurem külmatootlikkus kui teistel sekundaarsetel vedelikel. See vähendab pumbalt nõutavat võimsust ja vajalikku temperatuurierinevust soojusvahetis.

Tabel 5. CO₂ kaskaad-, sekundaarse ja booster süsteemide eelised ja puudused

Süsteem	Eelised	Puudused
Booster ehk otseaurustumise	<ul style="list-style-type: none"> • Üks külmaaine • Üks süsteem, väikseimad kulud • Parem efektiivsus kui HFC-süsteemidel 	<ul style="list-style-type: none"> • LT-rakendusteks on vaja kaheastmelist kompressiooni • Süsteemi eksploatatsiooni häired ühendatud süsteemides mõjutavad MT- (keskmine temperatuur) ja LT- (madal temperatuur) süsteeme • Suure rõhuga eksploatatsioon
Kaskaad	<ul style="list-style-type: none"> • Kaks lihtsat süsteemi • LT madala R744-ga, MT 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaks külmaainet, kuigi teises astmes võib kasutada

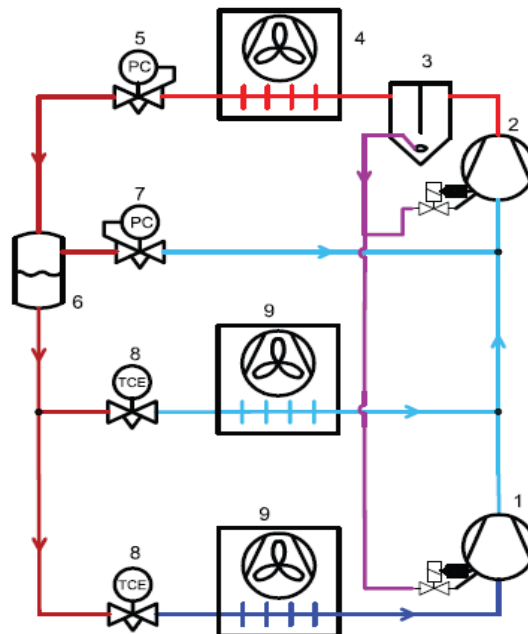
	<p>madala GWP-ga HFC-külmaainega</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standardsed HFC-komponendid keskmise ja madala temperatuuriga tsüklites • Väga efektiivne 	<p>R744</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatuurierinevused kaskaadsoojusvahetis vähendavad veidi LT-tsükli efektiivsust • Süsteemide eksploatatsiooni häired ühendatud süsteemides mõjutavad ka MT- ja LT-süsteeme
Sekundaarne	<ul style="list-style-type: none"> • R744 kasutamine sekundaarse vedelikuna, mis kasutab latentset kuumust, vajalik on väga väikese võimsusega pumpa • Lihtne külmutusseade ülemises astmes hõlpsalt saadaolevate komponentidega (eraldi jahuti MT ja LT jaoks) • Süsteem töötab püsiva rõhu juures, rõhu pulseerimiseta • Võimalus kombineerida LT- ja MT-süsteeme, pumba ringlussüsteem MT-s, kasutades R744 koos LT-booster süsteemiga • Jahutis saab kasutada madala GWP-ga HFC-sid või HC-sid. 	<ul style="list-style-type: none"> • Täiendav soojusvaheti ja temperatuurierinevus vähendavad veidi efektiivsust • Vajalik R744-pumpade kasutamine • Sellise võimsusega pumbad ei ole hõlpsalt kättesaadavad ja on paljude külmutusseadmete inseneride jaoks tundmatud

R744-süsteemide koosnevus

Tabel 6. CO₂ transkriitiline booster süsteem

Komponent	Tüüp	Viide
Alumise astme kompressor	Kasutatakse R744 jaoks dimensioneeritud kompressoreid.	1
Ülemise astme kompressor	Tuleb kasutada kompressoreid, mis on mõeldud spetsiaalselt transkriitilise R744 jaoks. Need on üldjuhul poolhermeetilised kolbkompressorid.	2
Õliseparaator ja õli tagastussüsteem	Õliseparaator ja õlimahuti töötavad samal põhimõttel, mis tavapärane õlitussüsteem.	3
Gaasijahuti/kondensaator	Tüüpiliselt õhkjahutusega, mitu ventilaatorit, ribitatud toruga tüüp.	4
Gaasijahuti	Kasutatakse rõhu moduleerimise ventiili, mida reguleerib	5

reguleerventiil	gaasijahuti surve ja survetemperatuur.	
Vedeliku ressiiver (vahemahuti)	Kõrgema rõhu jaoks dimensioneeritud standardne konstruktsioon.	6
Ressiivri rõhu reguleerventiil	Kasutatakse rõhu moduleerimise ventiili, mida reguleerib vedeliku ressiivris olev rõhk.	7
Termoreguleerventiil	Kasutatakse elektroonilisi termoreguleerventiile.	8
Aurusti	Üldjuhul kasutatakse kõrgema rõhu jaoks dimensioneeritud väiksema läbimõõduga toru ja vähem läbikäike.	9
Muu	Rõhuvabastusventiil: Kasutatakse suure tõstega tüüpe, et vältida ummistumist kuiva jääga, väljalaskerõhk on dimensioneeritud R744 jaoks. Filterkuivati: molekulaarse võrgu tüüpi, mis sobib kasutamiseks rõhu tingimustes. R410A jaoks dimensioneeritud filterkuivatit võib kasutada süsteemides, kus on madalam keskmine rõhk. Lülitid: kasutatakse kõrge ja madala rõhu välja lülitamiseks vastavalt nimirõhule.	



Joonis 9. CO₂ transkriitiline booster süsteem

Torustiku temperatuur

Oluline on arvestada sellega, et madala ja/või keskmise rõhu puhul on vedelikutorustiku temperatuur alla ümbritseva temperatuuri, mis tähendab, et puudub loomulik vedeliku järeljahutamine. Välja arvatud juhul, kui süsteemis on mehaaniline järeljahuti, puudub

termoreguleerventiili siseneva külmaaine järeljahutamine, kuid võivad tekkida gaasimullid. Seetõttu on elektrooniline termoreguleerventiil üledimensioneeritud, sageli kuni 30%.

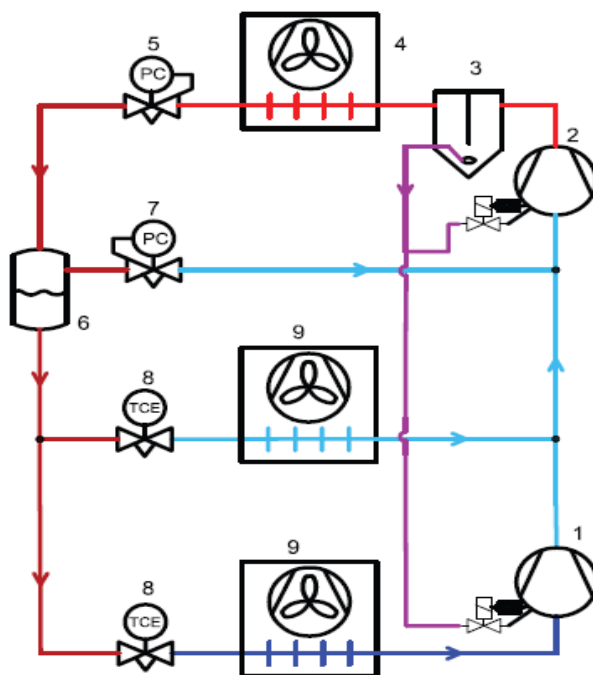
Kui vedelikutorustiku temperatuur on alla ümbritseva temperatuuri, peab see enamasti olema isoleeritud, et vähendada soojuskadu ja hoida ära kondenseerumist niiskes kliimas.

Käivitamine ja ekspluatatsioon

Ülemise astme kompressor(id) tuleb paigaldada ja käivitada enne alumise astme kompressorite käivitamist.

Tabel 7. CO₂ kaskaadsüsteemid

Komponent	Tüüp	Viide
Alumise astme kompressor	Madala temperatuuri jaoks kasutatakse R744 jaoks sobivaid kompressoreid	1
Ülemise astme kompressor	Keskmise temperatuuri jaoks kasutatakse HFC/HC/ammoniaagi jaoks sobivaid kompressoreid	2
Õliseparaator ja õli tagastussüsteem	Võib kasutada R410A jaoks dimensioneeritud komponente	3
Kaskaadsoojusvaheti	Üldjuhul plaatsoojusvaheti või kest ja toru	4
Vedeliku ressiiver	Kõrgema rõhu jaoks dimensioneeritud standardne konstruktsioon	5
Termoreguleerventiil	Üldjuhul kasutatakse elektroonilisi termoreguleerventiile	6
Aurusti	Üldjuhul kasutatakse väiksema läbimõõduga toru ja vähemal arvul läbikäike, dimensioneeritud kõrgema rõhu jaoks	7
Gaasijahuti/kondensaator	Üldjuhul õhkjahutusega, mitu ventilaatorit, ribitatud toruga tüüp	8
Muu	Aurujahuti: üldjuhul plaatsoojusvaheti. Rõhuvabastusventiil: võib kasutada R410A vabastusrõhu jaoks dimensioneeritud ventiile. Filterkuivati: võib kasutada R410A rõhu jaoks dimensioneeritud filterkuivatit. Tavaliselt kasutatakse molekulaarse sõela tüüpi. Lülitid: võib kasutada R410A jaoks dimensioneeritud kõrge ja madala rõhu lüliteid	



Joonis 10. CO₂ kaskaadsüsteemid

Torustiku temperatuur

Kuna enamik R744-torustikust on temperatuuril alla $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, on see isoleeritud, et vähendada külmaaine soojuskadu. Ainult kompressori ja kaskaadsoojusvaheti vaheline survetorustik on isoleerimata. Külmaaine kuumenemise vältimiseks on isoleeritud ka kõik komponendid, v.a R744-kompressorid.

Tavaliselt on vedela R744 temperatuur ümbritsevast temperatuurist madalam, mis tähendab, et see ei taga järeljahutamist vedelikutorus voolamise ajal. Välja arvatud juhul, kui süsteemis kasutatakse mehaanilist järeljahutit, toimub termoreguleeriventiili siseneva külmaaine küllastumine LT koormusel, mis vähendab aurusti külmatootlikkust. Termoreguleeriventiili dimensioneerimisel arvestatakse järeljahutuse puudumisega – üldjuhul valitakse 30% suurema võimsusega, kui tavaliselt oleks vaja.

Kaskaadsoojusvaheti

Üldjuhul on kaskaadsoojusvaheti (R744-kondensaator) plaat- või kest- ja torutüüpi soojusvaheti. Mida suurem on selle võimsus, seda madalam on temperatuuri erinevus kondenseeriva R744 ja aurustuva ülemise astme külmaaine vahel. Selle tulemusena suureneb kogu süsteemi efektiivsus.

Kaskaadkondensaator tuleb paigutada vedeliku ressiivrist kõrgemale, et tagada vedeliku R744 voolamine ressiivrisse ja mitte tagasi jahutisse.

R744 survetemperatuur on tavaliselt kõrge. See tingib suure temperatuurierinevuse kaskaadsoojusvahetisse siseneva ülekuumendatud R744 ja väljuva ülemise astme külmaaine



vahel. Kõrge ΔT võib põhjustada termilist pinget ja ebastabiilse töö eriti plaatsoojusvahetites. Kasulik on alandada kaskaadsoojusvahetisse siseneva R744 temperatuuri.

Seda saab teha aurujahuti kasutamise R744-kompressori(te) survetoru ja kaskaadsoojusvaheti vahel. Tagastatud soojust saab kasutada näiteks vee soojendamiseks. Selle eeliseks on kaskaadsoojusvahetist tagastatava soojushulga vähenemine.

Käivitamise ja eksploatatsiooni järjestus

Kaskaadsüsteemi käivitamise ja eksploatatsiooni järjestus on kriitilise tähtsusega. Ülemise astme süsteem peab olema töövalmis enne alumise astme süsteemi käivitamist või eksploatatsiooni. Muidu võib alumise astme süsteem seisata kõrgrõhu kaitse ja lõpptulemusena aktiveeruvad rõhuvabastusventiilid.

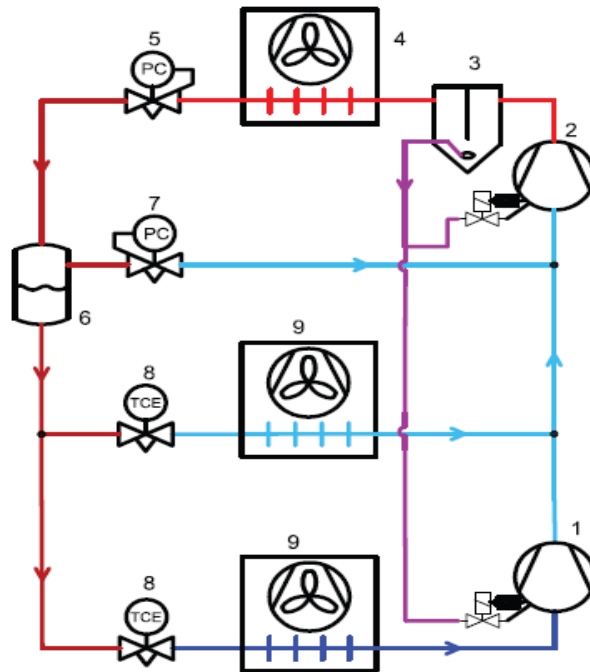
Ülemise astme süsteem

Ülemise astme süsteem on tavaliselt lihtne, kompaktne süsteem, mille külmaaine täitekogus on väike. Selles võib kasutada paljusid erinevaid külmaaineid ja üldjuhul sobib see kasutamiseks selliste looduslike külmaainetega, nagu süsivesinikud või R717. Ülemises astmes võib kasutada ka R744, kuid sel juhul on see aastaajast (ümbritsevast temperatuurist) olenevalt transkriitiline. Ülemise astme süsteemi kompressoreid juhitakse tüüpiliselt rõhuga alumise astme ressiivris (st R744 kondenseerumistemperatuur).

Koormuse langedes alaneb ka R744 ressiivris olev rõhk ja seega väheneb ülemise astme kompressori tootlikkus. Kui R744-süsteemi koormus tõuseb, siis tõuseb ressiivris olev rõhk, mis põhjustab ülemise astme kompressori tootlikkuse suurenemise (st ülemise astme kompressorid lülituvad sisse või hakkavad kiiremini tööle).

Tabel 8. CO₂ sekundaarne süsteem

Komponent	Tüüp	Viide
Vedelikupump	Üldjuhul kasutatakse vedelikjahutusega tsentrifugaalpumpasid	1
Soojusvaheti	Üldjuhul kasutatakse standardseid soojusvaheteid, näiteks plaatsoojusvahetid	2
Ressiiver	Üldjuhul kasutatakse standardset vedeliku ressiivrit	3
Aurusti	Kasutatakse standardseid HFC-aurusteid	4
Ülemise astme süsteem koos kompressoriga	Ülemise astme süsteem on enamasti tavapärase jahuti, mis töötab HFC- või HC-ga	5
Kompressor	LT-abikompressor	6
Muu	Rõhuvabastusventiil	7

Joonis 11. CO₂ sekundaarne süsteem

Vedelikupump

Vedelikupump on tavaliselt tsentrifugaaltüüpi. Kavitatsiooni vältimiseks on oluline, et pumba siseneks puhas vedel külmaaine – gaasimullid vedelikus vähendavad pumba töökindlust ja jõudlust. Sellepärast peab ressiiver asuma pumba kohal. Lisaks on ressiivri väljalase konstrueeritud nii, et oleks välditud gaasimullide tekkimine. Selleks paigaldatakse näiteks keerisemurdja (tavaliselt on selleks vahesein ressiivri väljalaskeava juures). See hoiab ära keerise moodustumise, mis võiks kanda auru vedelikku, põhjustades pumba kavitatsiooni.

Torustiku temperatuur

Kuna R744 vedeliku temperatuur on ümbritsevast temperatuurist madalam, tuleb vedelikutorustik isoleerida.

Määrdeained ja õli tagastamine süsteemides

Polüolestri (POE) tüüpi määrdeainetel on hea segunemisvõime R744-ga ja neid kasutatakse peamiselt kompressorimäärtena R744 kaubanduslikes süsteemides. Suure lahustuvuse tõttu kasutatakse suurema viskoossusega määrdeaineid võrreldes nendega, mida kasutatakse koos HFC-ga. See vähendab õli lahjendamist külmaaine poolt ja seetõttu säilivad määrimisomadused.

Kuna POE õlid on väga hügroσκοopsed (st need imavad hästi niiskust), tuleb tagada, et niiskus ei satuks süsteemi:

- määrdeainet ei tohi jätta õhu kätte ja õlimahutid tuleb tihedalt sulgeda, v.a õli võtmisel;
- osad, nagu kompressor, peavad samuti olema suletud (hermeetiliselt), v.a reaalse töö ajal;
- tühjendamisprotsess peab olema efektiivne;
- kui süsteem on lahti ja õhule avatud, tuleb alati paigaldada vahetatavad kuivatipadrunid.

Nii nagu HFC-külmaained, on ka R744 õlist raskem. Kaubanduslikes külmutussüsteemides on oluline õli efektiivne eraldamine ja tagastamine. Üldjuhul saavutatakse see kõige paremini koalestsent-tüüpi õlieraldajate kasutamisega, kui kasutatakse mitut kompressorit, siis tavalise õlitagastussüsteemi abil.

Materjalid

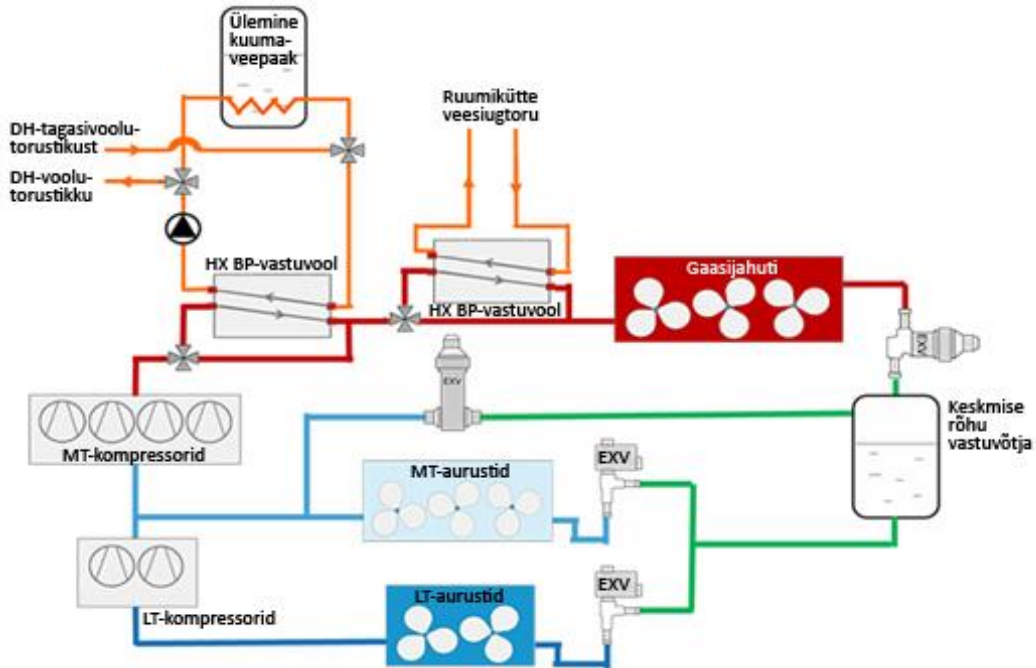
R744 ühildub enamike materjalidega, mida kasutatakse kaubanduslikes külmutusseadmetes. Elastomeere tuleb hoolikalt valida, sest R744 tungib läbi materjali suuremas koguses kui teised külmaained. Kui nendest materjalidest valmistatud tihendid rõhu alt vabastada, siis aurustub imendunud R744 kiiresti, põhjustades plahvatusliku dekompressiooni ja tihendi kahjustumise. Mõned tihendusmaterjalid paisuvad ja pehmenevad R744 mõjul.

Kõrgete rõhkude tõttu kasutatakse R744-süsteemides sageli terastorusid, eriti survetorustikes ja kollektorites. Madalatel temperatuuridel võib teras muutuda hapraks.

Soojuse taaskasutamise võimalused

Ühesuguste aurustumise ja ümbritsevate temperatuuride juures on R744-süsteemi survetemperatuur kõrgem kui HFC-süsteemides. See tagab suuremad võimalused soojuse taaskasutamiseks kasulikul temperatuuril.

Kui külmaaine on transkriitiline, siis selle temperatuur gaasijahutis väheneb soojusvahetuse protsessi vältel – kogu soojuse ülekanne toimub muutuva temperatuuri juures. See on eelis võrreldes subkriitilise kondensaatoriga, mille puhul külmaaine temperatuur langeb ainult auru jahutamisel, mis on vaid väike osa protsessist. Seejärel jääb see kondenseerudes püsivale temperatuurile (kondenseerumistemperatuur). Suurem osa soojuse ülekandest toimub ühtlase temperatuuri juures.



Joonis 12. Soojuse utiliseerimine CO₂ süsteemis

4.1.4. R744-süsteemide hooldus

Üldine hooldus

Töökohas peab olema hea ventilatsioon. Kui puudub töötav püsiv lekkevastussüsteem, peab tehnik kasutama isiklikku R744-detektorit, et veenduda ala ohutuses töötamiseks. Kasutada tuleb sobivaid isikukaitsevahendeid, sh kindad, kaitseprillid ja kuulmiskaitsevahendid. Tööriistad ja seadmed, näiteks voolikud, peavad vastama süsteemi, R744-ballooni ja lämmastikuballooni rõhule, kui neid kasutatakse.

Süsteemiga tegelemisel tuleb olla ettevaatlik – tehnik peab olema süsteemiga tuttav ja mõistma, kuidas süsteemi sektsioonid on turvaliselt isoleeritud. See hõlmab ka klappide sulgemise mõju süsteemile ja R744 vedeliku kinnijäämise võimalust suletud klappide vahele.

Torustik

Torustik tuleb paigaldada hea tava kohaselt, et minimeerida rõhu langust ja võimaldada õli tagastust kompressorisse. Halvasti kinnitatud toru paiskub toru või liitekoha katkemisel suure kiirusega eemale ja võib põhjustada vigastuse või surmaga lõppeda võiva õnnetuse.

Kõige töökindlam meetod torustiku ühendamiseks on jootmine või keevitamine. Kõigi ühenduste puhul on soovitatav, et jootjad ja keevitajad oleks riiklikult tunnustatud standardi kohaselt atesteeritud. Erilist tähelepanu tuleb pöörata ühenduse ohukategooriale ning nõutud oskuste tasemetele ja sertifikaatidele jootmis- või keevitustööde tegemiseks. Võimaluse korral tuleb vältida mehaanilisi ühendusi. Kui neid kasutatakse, peavad liitmikud vastama rõhule ja järgida tuleb tootja kehtestatud juhendit.

Valmis paigaldise tugevust ja lekkekindlust tuleb süsteemi maksimaalse lubatava nominaalse töö rõhuga katsetada asjakohase standardi kohaselt. Rõhuvabastusventiilid tuleb rõhuga katsetamise ajal isoleerida.

Tühjendamine

Süsteemid tuleb hoolikalt tühjendada mittekondenseeruvate gaaside ja niiskuse eemaldamiseks – mõlematel on R744-süsteemidele kahjulik mõju.

Mittekondenseeruvad gaasid, nagu õhk ja lämmastik, kipuvad kogunema kondensaatorisse või gaasijahutisse, kus põhjustavad rõhu tõusu. See vähendab süsteemi tootlikkust, efektiivsust ja töökindlust. Mittekondenseeruvate gaaside mõju R744-süsteemis on suurem kui HFC-süsteemides, eriti transkriitilistes süsteemides.

Kõrge niiskussisaldus põhjustab süsteemi rikkeid, näiteks vesi ja süsihappegaas tekitavad süsihapet. See on rohkem tõenäoline ülekuumendatud aurus aurusti väljundi ja kompressori imemisava vahel, eriti LT-aurustite puhul. Kui niiskusel lastakse koguneda süsteemi staatilisse osasse, võib see külmuda ja paisuda, põhjustades toru rikke.

R744-ga täitmine

R744 on saadaval vedeliku väljavõtu- või gaasi väljavõtuventiiliga balloonides. Kuna balloonid on raskemad kui teiste külmaainete balloonid, tuleb neid käsitseda ettevaatlikult – näiteks teisaldamiseks tuleks kasutada kätse. Läbimõõdu ja kõrguse suhte tõttu on need tavaliselt ebastabiilsemad kui teiste külmaainete balloonid ning need tuleb kasutamisel, hoiustamisel või transportimisel fikseerida.

Seadmed, mida kasutatakse ballooni ühendamiseks süsteemiga, peavad vastama rõhule. Ballooni ühendamiseks tuleb kasutada ballooni ventiili jaoks sobivat liitmikku. Kasutada ei tohi standardset HFC-ballooni adapterit. Kõik täiteliinid tuleb enne täitmist tühjendada või puhastada, et vähendada õhu ja niiskuse sattumist süsteemi.

Kaskaadsüsteemide alumise astme täitmine

Enne kaskaadsüsteemi alumise astme täitmist peab ülemine aste olema töövalmis. Seega tuleb ülemine aste täita ja käitada enne alumise astme täitmist.

Transkriitilise booster otseaurustumissüsteemi täitmine

Süsteemi ei tohi täita imemisliini kaudu. Süsteemid, mille keskmine rõhk on ballooni rõhust kõrgem, tuleb tühjemaks pumbata või nende keskmist rõhku alandada, et võimaldada külmaainega täitmist. Teine võimalus on tõsta balloonis olevat rõhku, soojendades ballooni termostaatilisel juhitava küttekahaga.

Ülemise astme kompressorid peavad olema töövalmis enne alumise astme kompressorite käivitamist.

Süsteemi kontrollimine

Enne süsteemi esmakordset käitamist tuleb teha järgnevad kontrolltoimingud:

- visuaalne kontroll;
- süsteemi dokumentatsioon ja selle tähistused, eriti rõhu all olevate seadmete omad;
- ohutusseadiste paigaldus;
- kontrollkatsed kõikide juhtimisfunktsioonide nõuetekohase eksploatatsiooni tagamiseks, sh kõrge ja madala rõhu ning õlirõhu tarvikud, blokeeringud, andurid ja juhtimisseadised. Kontroll peab hõlmama ka manuaalset varusüsteemi, kui see on olemas;
- kõikide kaitseseadiste ja teiste rõhukatkestite seatud rõhk;
- gaasijahuti rõhk;
- reguleerventiili seatud rõhk;
- kompressori ja õlimahuti õlitasemed;
- filterkuivatite padrunid on paigaldatud;
- rõhukatse andmed;
- kõik ventiilid on lahti/kinni olenevalt süsteemi eksploatatsiooni vajadusest.

Esimesel kasutuskorral tuleb kontrollida ka järgmist:

- spiraalkompressorite faasi pööramine;
- tiiviku pöörlemine, kontrollige enne kompressorite käivitamist – pöörake ventilaatorid käsitsi;
- külmaaine tase;
- kompressorite ja õlimahuti õlitasemed;
- termoreguleerventiil ülekuumendus;
- kaskaadsoojusvaheti rõhk ja temperatuur;
- reguleerventiil nii subkriitilises kui ka transkriitilises režiimis;
- ressiivri rõhu reguleerventiili töö rõhk;
- lisakülmutusseadmete eksploatatsioon.

Lekke tuvastamine

R744-süsteemides on suur lekkeoht kõrgemate rõhkude ja molekuli väiksema suuruse tõttu. Kaubanduses kasutatavatel R744 kesksel süsteemidel on palju ühenduskohti, mille tõttu suureneb lekkeoht veelgi. Lekkimine on ohtlik ja suurendab süsteemi energiatarvet. Kuigi R744 on väga väikese GWP-ga, lekke tuvastamine omab kriitilist tähtsust. Lekete tuvastamiseks võib kasutada alljärgnevat meetodeid:

- visuaalne kontroll – kui süsteemis on palju lekkeid, on selle peal ja ümber õliplekid;
- lekke tuvastamise pihusti, kuigi seda on keeruline kasutada isoleeritud ühenduskohtades ja paigaldiste osades, kus temperatuur on alla 0 °C;
- R744 jaoks sobiv käeshoitav elektrooniline lekkedetektor, mis üldjuhul põhineb infrapunatehnoloogial;
- ultraheli-lekkedetektor.

Lekke tuvastamine peab olema meetodiline ja hõlmama kogu süsteemi. Pärast tuvastamist tuleb lekkesid võimalikult kiiresti kõrvaldada.

Hooldus

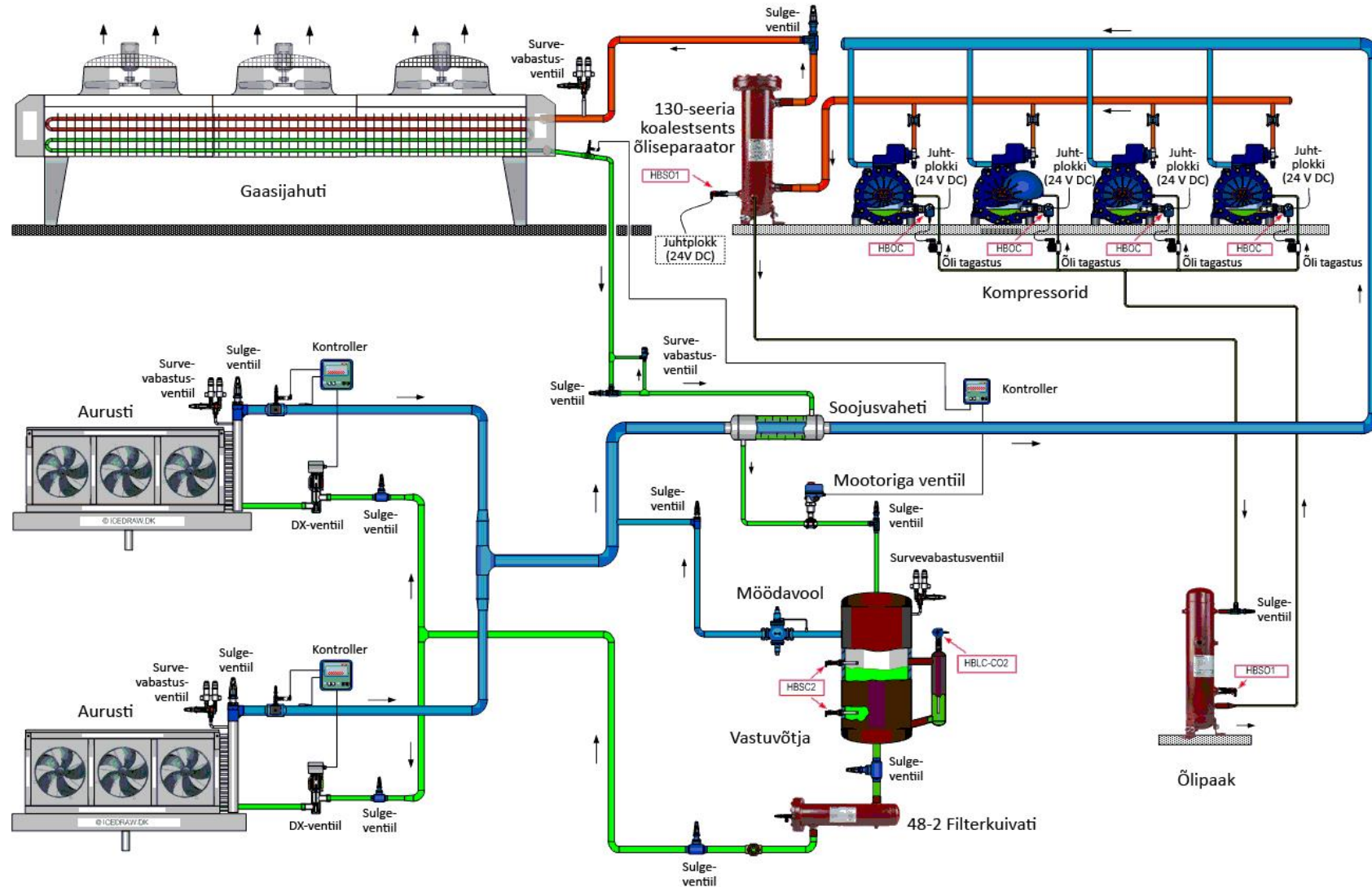
R744-süsteeme tuleb hooldada hea tava kohaselt, mis hõlmab järgmist:

- süsteemi üldise seisukorra kontrollimine;
- õlitaseme kontrollimine;
- külmaaine taseme kontrollimine;
- kaitselülite, andurite ja sensorite kontrollimine ja katsetamine;
- vajaduse korral õlifiltrite ja filterkuivatite vahetamine;
- happekatsede tegemine õliproovil;
- R744-detektorite ja häirete kontrollimine;
- reguleeriventiili eksploatatsiooni kontrollimine tootja juhiste kohaselt;
- tehaseruumi ventilatsiooni kontrollimine.

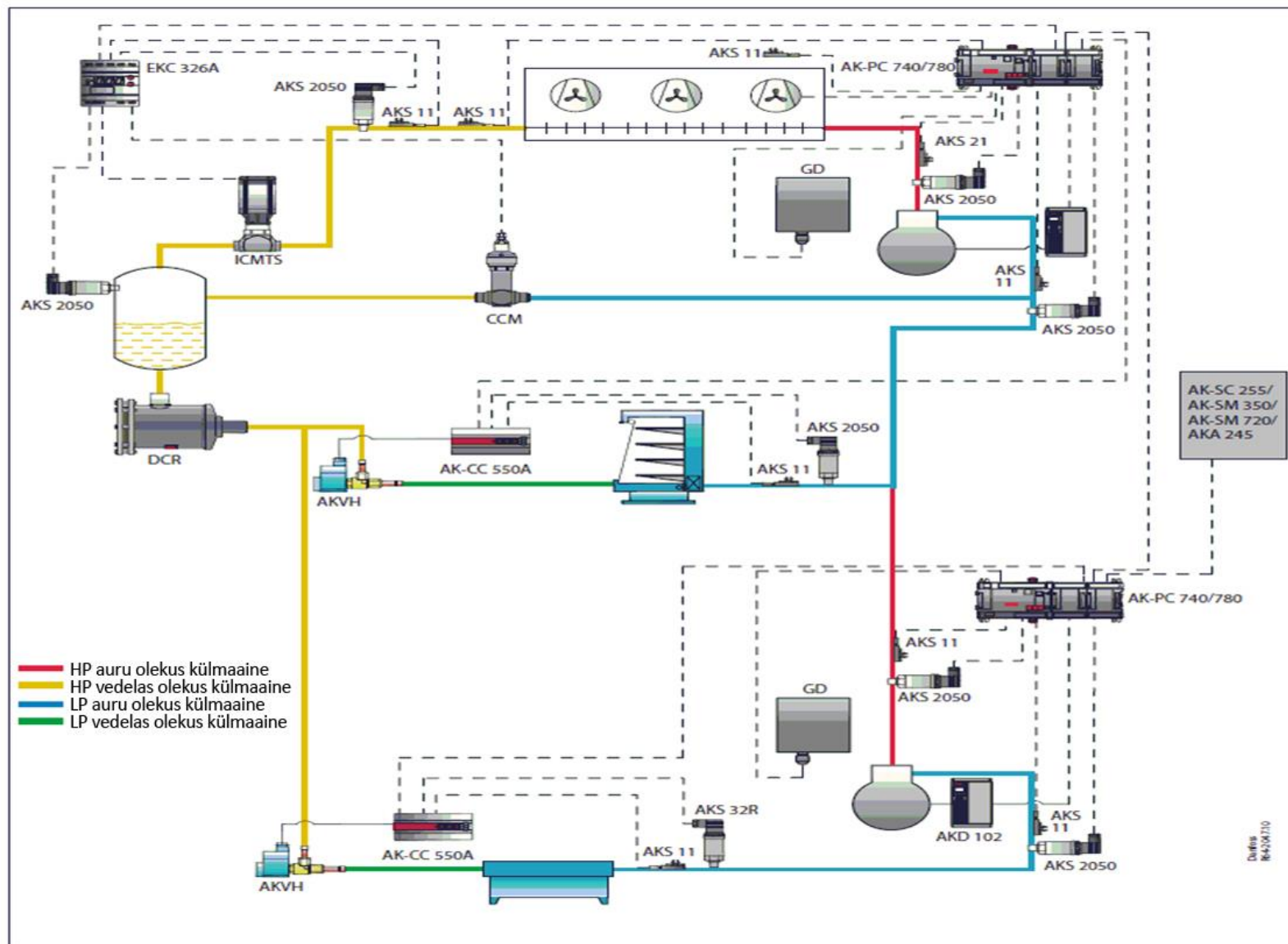


Joonis 13. CO₂ komplektne külmajaam

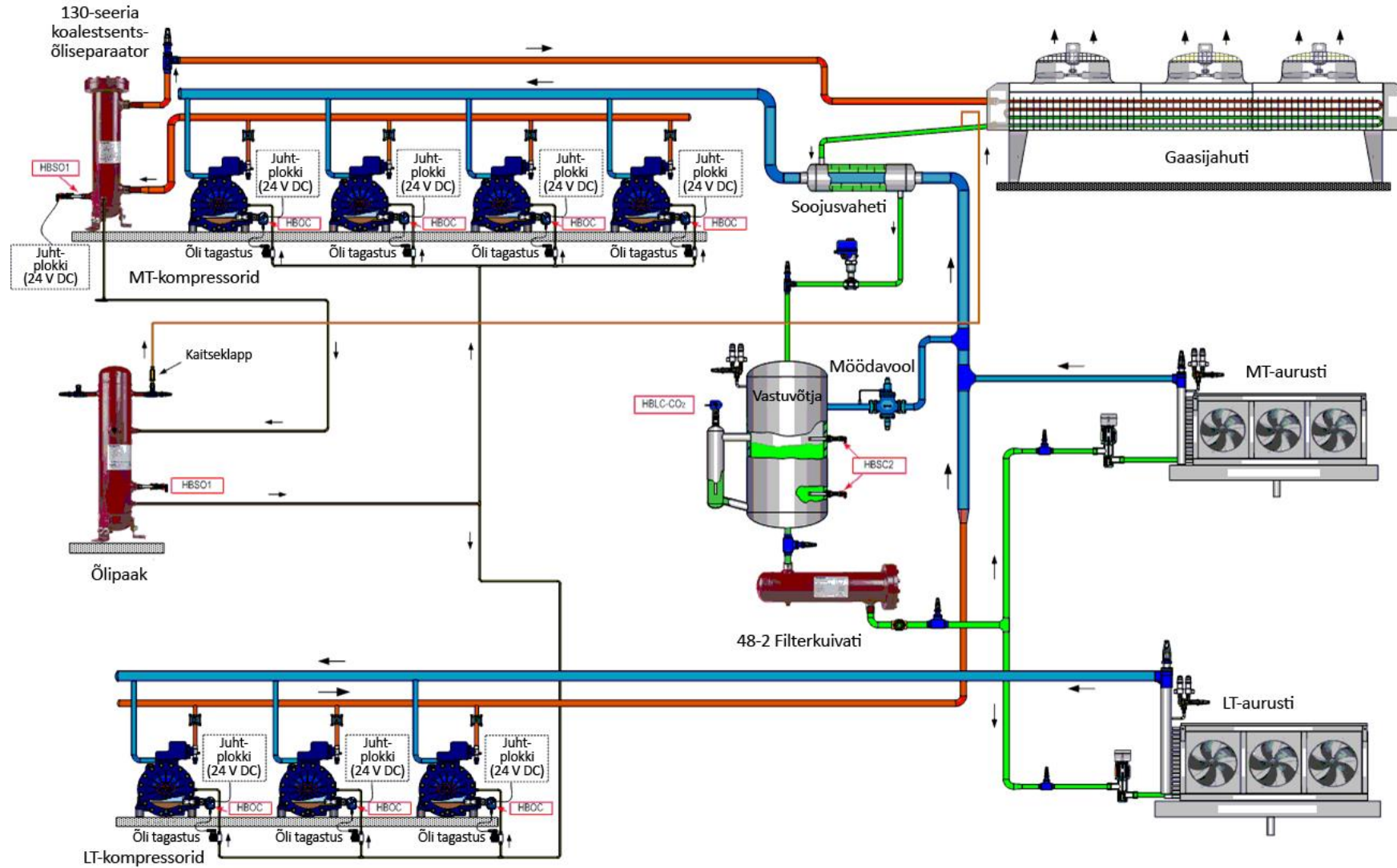
Tüüpilised skeemid:



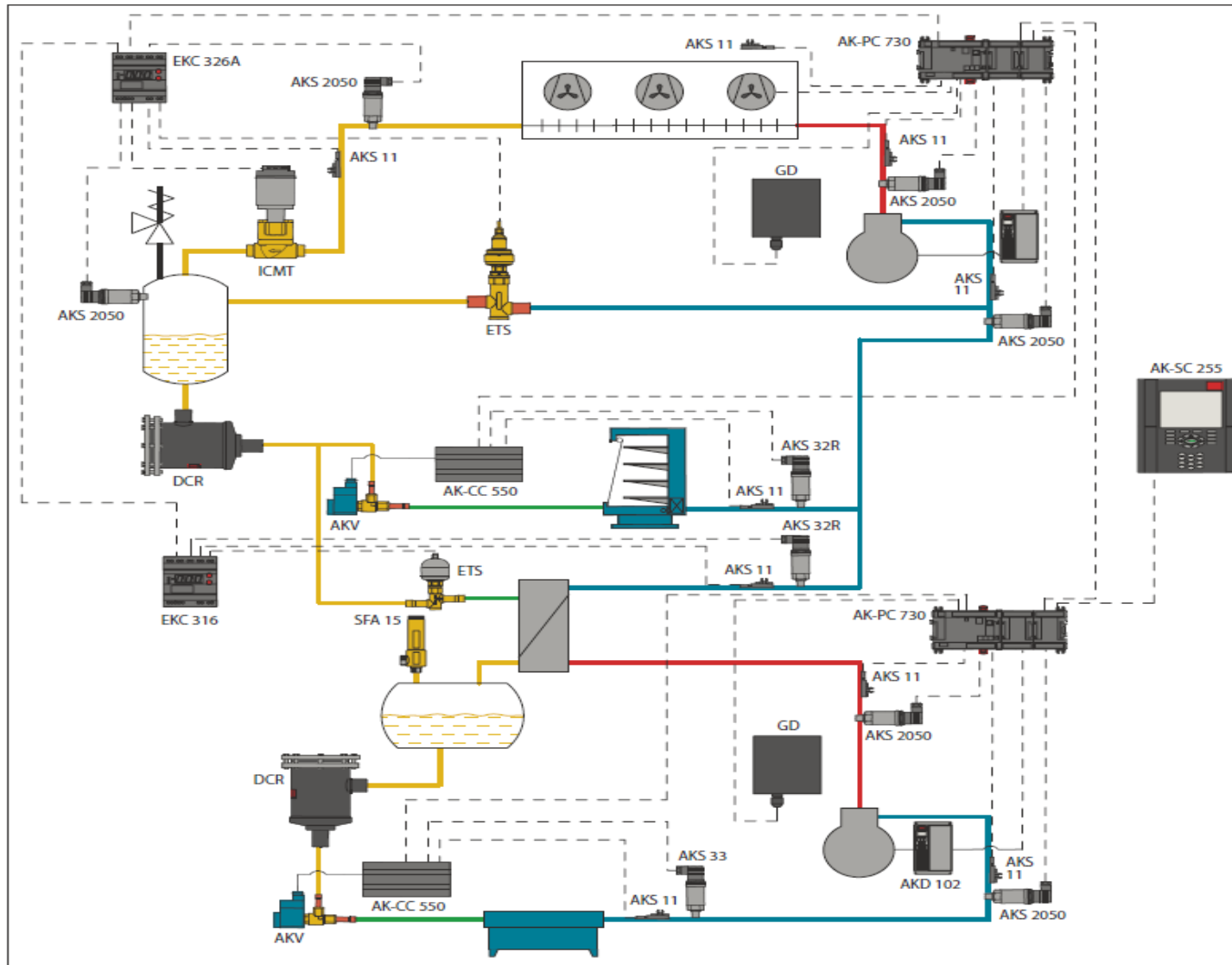
Joonis 14. Üheastmeline transkriitiline R744-süsteem, põhimõtteline skeem



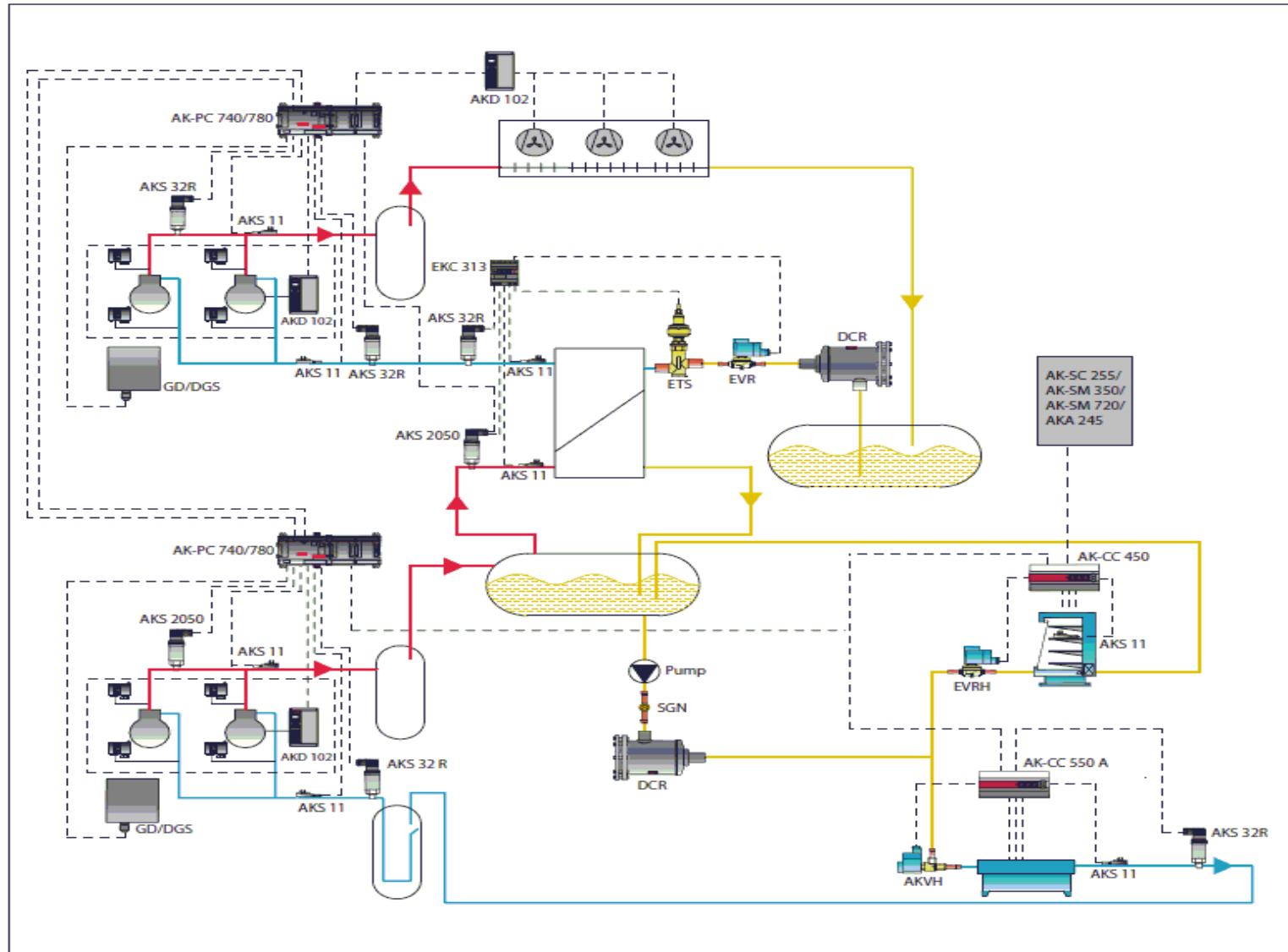
Joonis 15. Kaheastmeline transkriitiline R744-süsteem, põhimõtteline skeem



Joonis 16. Kaheastmeline CO₂ süsteem



Joonis 17. Klassikaline kaskaadsüsteem, põhimõtteline skeem



Joonis 18. Kaskaad-pumpsüsteem, põhimõtteline skeem

4.2. Ammoniaak

Ammoniaak (keemiline sümbol NH_3 , külmaaine tähis R717) on õhurõhu juures värvitu gaas. Osooni mittekahandav ja GWP-d mitteomav, atmosfääris lühikese elueaga, ei moodusta mingeid negatiivse keskkonnamõjuga kõrval- või lagunemissaadusi. Ühildub mõnede, kuid mitte kõikide laialdaselt kasutatavate külmutusseadmete määrdeainetega. Esmajoones ei sobi see kasutamiseks koos polüolestri- (POE) ja polüvinüüleetri- (PVE) põhiste määrdeainetega ning piiratud ulatuses polüalküleenglükooli- (PAG) põhiste määrdeainetega.

4.2.1. Põhiomadused

R717 on õhurõhu juures suhteliselt kõrge küllastustemperatuuriga, väga mürgine, mõõdukalt tuleohtlik ning terava lõhnaga. Lõhna võib tunda juba 3 mg/m^3 kontsentratsiooni korral, seega on see tuvastatav ohtlikust tasemest (350 mg/m^3) palju madalama taseme juures. See on ainus laialdaselt kasutatav külmaaine, mis on õhust kergem. See tähendab, et välja lekkinud külmaaine hajub kiiresti.

Suure toksilisuse tõttu on R717 kasutamine piiratud väga väikese täitekogusega süsteemidega või tööstuslike süsteemidega (st süsteemid kohtades, mis ei ole avalikkusele ligipääsetavad). Tüüpiliselt kuuluvad siia hulgimüüjate külmlaod ja toiduainete töötlemise ettevõtted, kus kasutatakse tavaliselt sekundaarseid süsteeme, milles R717 on primaarne külmaaine.

Siiski on viimastel aastatel tehtud edusamme ohtude vähendamiseks inimese tervisele, eriti ammoniaagipaigaldiste suhtes rahvarohketel aladel. Nende hulka kuulub ammoniaagi kasutamine koos teiste külmaainetega, näiteks sekundaarsetes süsteemides, et vähendada ja isoleerida ammoniaagi väljalekkimist täiustatud kaitseseadiste abil, paigaldades kaitsekestasid või kasutades ammoniaagi imamise süsteeme.

Rõhk ja temperatuur

Suhteliselt kõrge küllastustemperatuur tähendab, et paljud madalatemperatuurilised installatsioonid (nt külmutatud toiduainete laod ja kiirjahutid) töötavad alumises astmes õhurõhust madalamatel rõhkudel. R717 töötab ka väga kõrgetel survetemperatuuridel. Seetõttu saab üheastmelist kompressiooni normaalselt kasutada aurustumistemperatuuril üle -10°C . Alla selle on vajalik kaheastmeline kompressioon astmetevahelise jahutusega.

Materjalide koostõju

Kuna ammoniaak korrodeerib vaske, vasesulameid ja tsinki, tuleb kasutada süsinikterasest, roostevabast terasest või alumiiniumist torustikku ning avatud ajamiga kompressoreid. Kuna see ei segune tavapäraste mineraalõlidega, tuleb külmutusseadmetes õli rektifitseerida. Terastorude ja avatud ajamiga kompressorite kasutamine ning õli rektifitseerimine mõjutab ammoniaagipaigaldise kapitalikulukust.

Efektiivsus

Ammoniaak on üks kõige efektiivsemaid olemasolevaid külmaaineid, mida saab kasutada kõrgetel kuni madalatel temperatuuridel. Ajal, kui energiatarbele pööratakse järjest suurenevat tähelepanu, on ammoniaagisüsteemid turvaline ja jätkusuutlik valik. Üldjuhul on uputatud ammoniaagisüsteem 15–20% võrra efektiivsem kui samaväärsed R404A süsteemid.

NH₃ ja CO₂ kombinatsiooni edasiarendused on aidanud efektiivsust veel rohkem suurendada. NH₃/CO₂-kaskaad on väga efektiivne madala ja väga madala temperatuuriga kasutusvaldkondades (alla –40 °C), samas on NH₃/CO₂ soolveesüsteemid umbes 20% võrra efektiivsemad kui traditsioonilised soolveed.

NH₃ kui külmaaine

R717-süsteemi projekteerimise erinevused on peamiselt tingitud selle toksilisusest, mõõdukast tuleohtlikkusest, kõrgest survetemperatuurist, materjalide ühildamatusest ja õliga segunematuses:

- täitekogus on piiratud toksilisuse tõttu (R717 on klassifitseeritud kui rühma B2 külmaaine);
- mõned elektrilised osad on konstrueeritud kasutamiseks plahvatusohtlikus keskkonnas. See kohaldub mõõdukalt tuleohtlikele külmaainetele, nagu R717;
- tüüpiline maksimaalne süsteemi rõhk (PS) kõrgema astme jaoks on 22 bar ning tüüpiline PS alumise astme jaoks on 11,4 bar, mis tähendab, et rõhud ei ole liiga suured;
- kaheastmelist kompressiooni kasutatakse madalatemperatuurilistes rakendustes, nagu külmutatud toiduainete töötlemine ja hoiustamine, et vältida liigseid survetemperatuure;
- R717 korrodeerib vaske, seega on torustik ja liitmikud tavaliselt terasest ning kasutatakse spetsiaalselt R717 jaoks konstrueeritud avatud ajamiga kompressoreid;
- kuna R717 on täiesti segunematu kompressori määrdeainega, püsib külmutusseadme alumisse astmesse pandav määrdeaine õlikihina R717 all. Paigaldada tuleb määrdeainejääkide utiliseerimisseadmed, eelistatult integreeritud õlitaastussüsteem, mis kogub õli ja saadab selle tagasi õlimahutisse;
- R717 on mürgine ja väga madala praktilise piirväärtusega (0,00035 kg/m³). Tuleb kasutada pidevat lekketuvastust, kui leke võib põhjustada maksimaalse kontsentratsioonini ületamise. Alumine tase tuleb seada väärtusele 500 ppm, mis peab aktiveerima mehaanilise ventilatsiooni ja kontrollitava helisignaali. Ülemine tase tuleb seada väärtusele 30 000 ppm, mis peab tehase seiskama ja elektriliselt isoleerima.

4.2.2. Kasutusvaldkonnad

Tänapäeval kasutatakse ammoniaaki peamiselt tööstuslikes külmutusseadmetes:

- hulgimüüjate külmaod;
- jahutustunnelid;
- pruulikojad;
- toidutöötlemisettevõtted (tapamajad, jäätisetehtased jms);
- kalatraalerid.

Nendes rakendustes tuleb kasutada suure täitekogusega süsteeme, samas kui tehakse suuri pingutusi väikese keskmise tarbega ammoniaagisüsteemide väljatöötamiseks, et ammoniaagi kasulikke termodünaamilisi ja keskkonnavalaseid omadusi paremini ära kasutada. Mõnede tarvikute tootjate poolt tehtavad jõupingutused on suunatud uute, kõrgtasemel juhtimisalgoritmidega väikese täitekogusega süsteemide väljatöötamisele ning ammoniaagi jaoks optimeeritud soojusvahetite, DX-süsteemide ja CO₂-ga uute kaskaadsüsteemide edasi arendamisele.

4.2.3. NH₃ tüüpilised süsteemid

Hajussüsteemid

Ammoniaagi hajussüsteemid on üsna populaarsed paljudes tööstuslikes külmutusseadmetes, kus ammoniaagi täitekoguse suurus ei oma kriitilist tähtsust. Selliste süsteemide suurim eelis on see, et need võivad saavutada suurima energiatõhususe laias temperatuurivahemikus (kuni umbes -40 °C).

Hajussüsteemid on tuntud oma pikaajalise usaldusväärse eksploatatsiooni poolest ja selliseid süsteeme kasutatakse laialdaselt kogu maailmas. Nende süsteemide kasutamist piirab peamiselt suur ammoniaagi täitekogus, mille vähendamiseks võib kasutada NH₃ jahuteid koos näiteks CO₂-ga.

Ammoniaagi hajussüsteemid võivad olla ühe- või kaheastmelised. Neid võib varustada ka ökonomaiseritega. Üldjuhul retsirkuleeritakse ammoniaak pumpade abil aurustitesse.

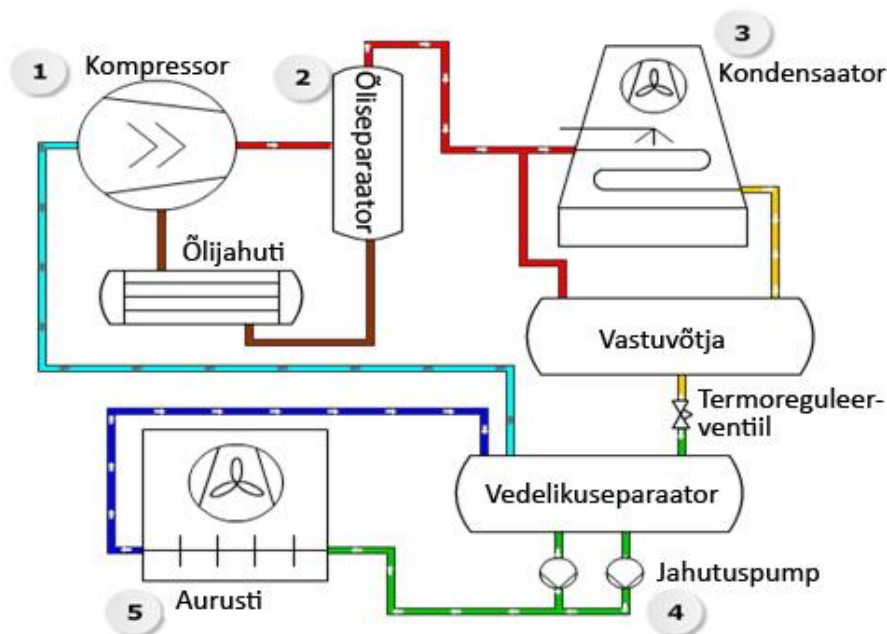
Üheastmelised hajussüsteemid

Ammoniaagi üheastmelisi süsteeme kasutatakse ainult ühe temperatuuritasemega süsteemides, näiteks jahutites. Enamikus ammoniaagi üheastmelistes süsteemides toimub külmaaine retsirkulatsioon läbi pumba aurustitesse. Samuti on olemas otsepaisumisega ammoniaagisüsteemid, mida kasutatakse peamiselt sellistes rakendustes, kus ammoniaagi täitekogus on väike. Otsepaisumisega süsteemid ei ole kuigi levinud. Põhjuseks on väiksem efektiivsus ja asjaolu, et ülekuumendamist on raske kontrollida. Üheastmelisi süsteeme

kasutatakse kõrgetel kuni keskmistel temperatuuridel. Efektiivsuse parandamiseks on üsna tavaline ka ökonomaiseri kasutamine.

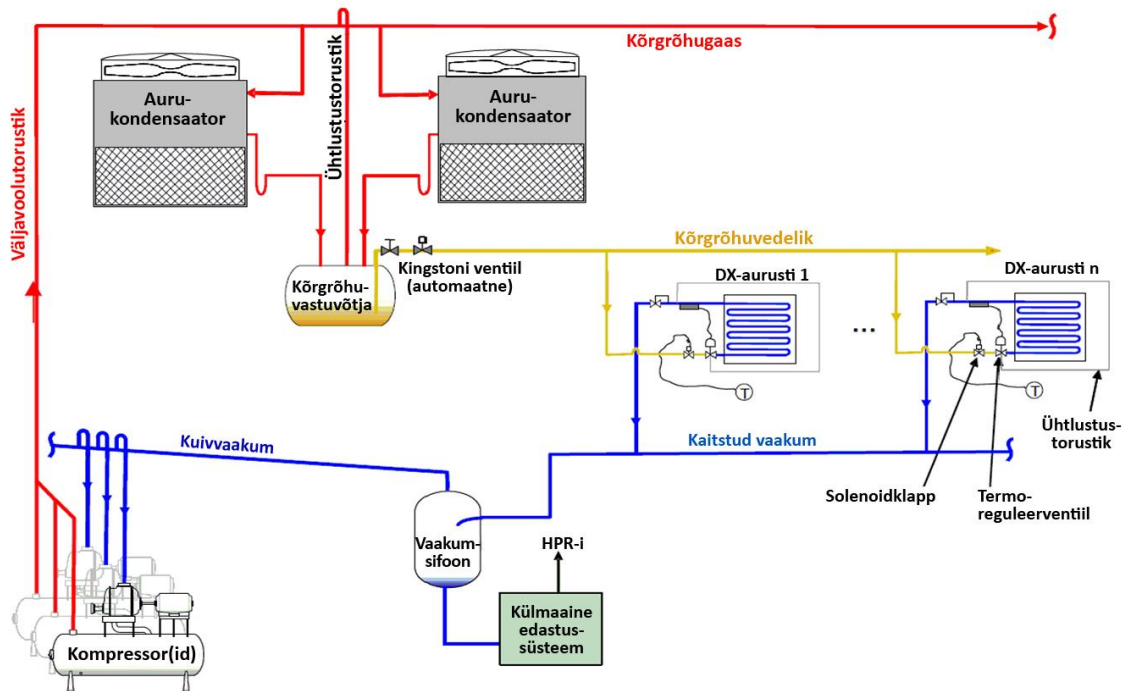
Põhiosad:

1. kompressor;
2. õlisüsteem;
3. kondensaator;
4. kõrg- ja madalrõhuressiivrid;
5. aurustid.



Joonis 19. Üheastmeline hajussüsteem

Tavaliselt kasutatakse ammoniaagisüsteemide sulatamiseks kuuma gaasi (ei ole joonisel näidatud). Kuuma gaasiga sulatamine annab energiatõhususe lisaelse võrreldes alternatiivsete sulatismeetoditega.

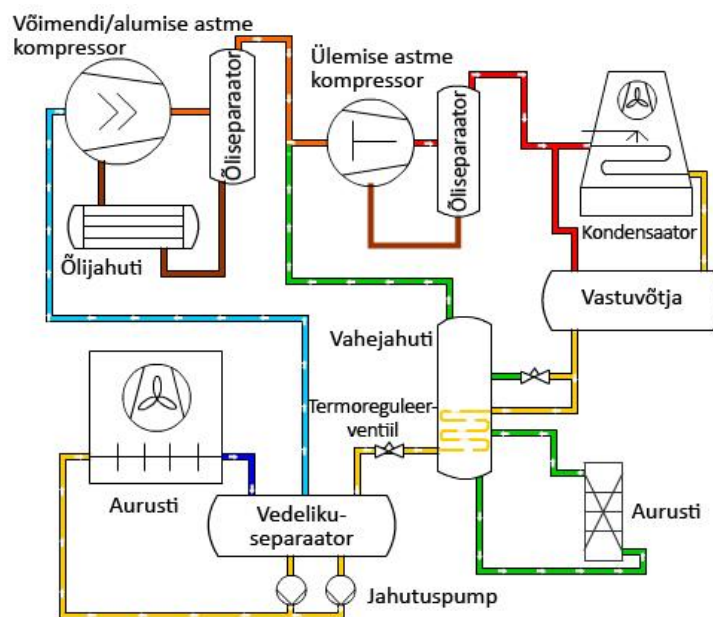


Joonis 20. Üheastmeline otseaurustumisega ammoniaagisüsteem

Kaheastmelised hajussüsteemid

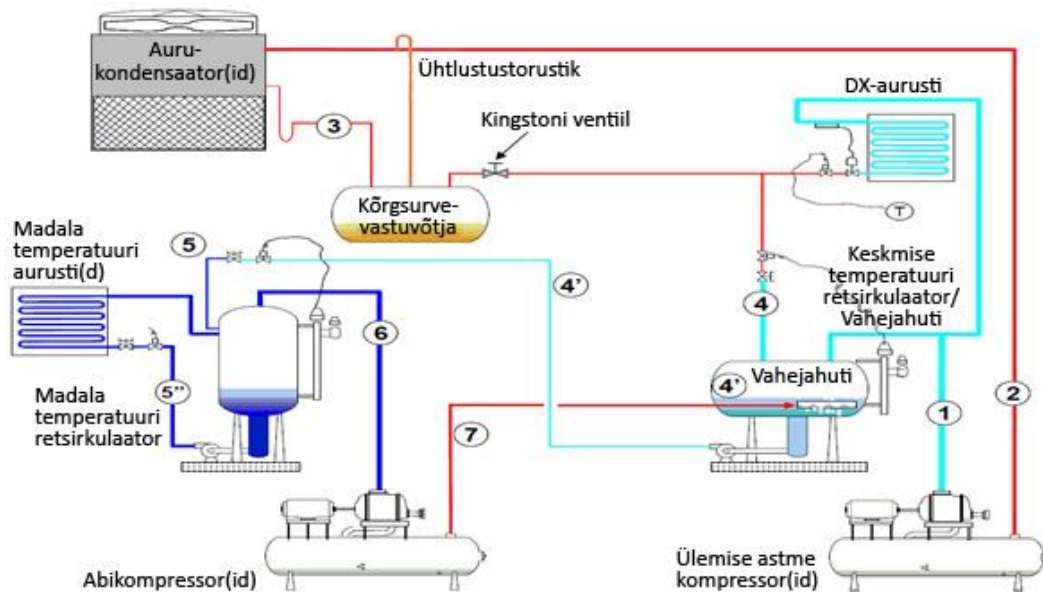
Kaheastmelisi ammoniaagisüsteeme kasutatakse tavaliselt ka madala temperatuuriga süsteemides või kõrge temperatuuriga küttesüsteemides. Süsteemides, kus kombineeritakse kütte- ja külmutusseadmeid, võib olla ka rohkem astmeid.

Kaheastmelised süsteemid tagavad suurema efektiivsuse, kuid on samaväärsetest üheastmelistest süsteemidest keerukamad. Kaks temperatuuritaset saab luua siis, kui kõrge temperatuuriga kompressorile lisada termiline lisakoormus.



Joonis 21. Kaheastmelised hajussüsteemid

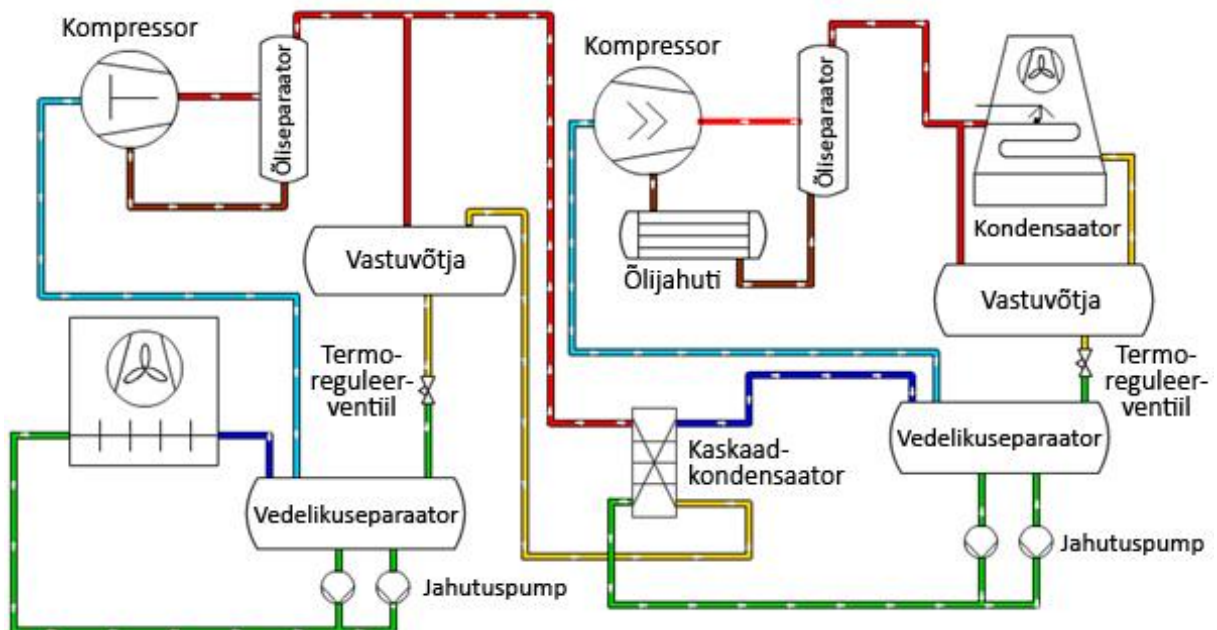
Üsna tavaline on kombinatsioon tigukompressoritest alumise astme (võimendid) ja kolbkompressorist kõrgema astme jaoks.



Joonis 22. Kaheastmeline ammoniaagisüsteem

NH₃/CO₂-kaskaadsüsteem

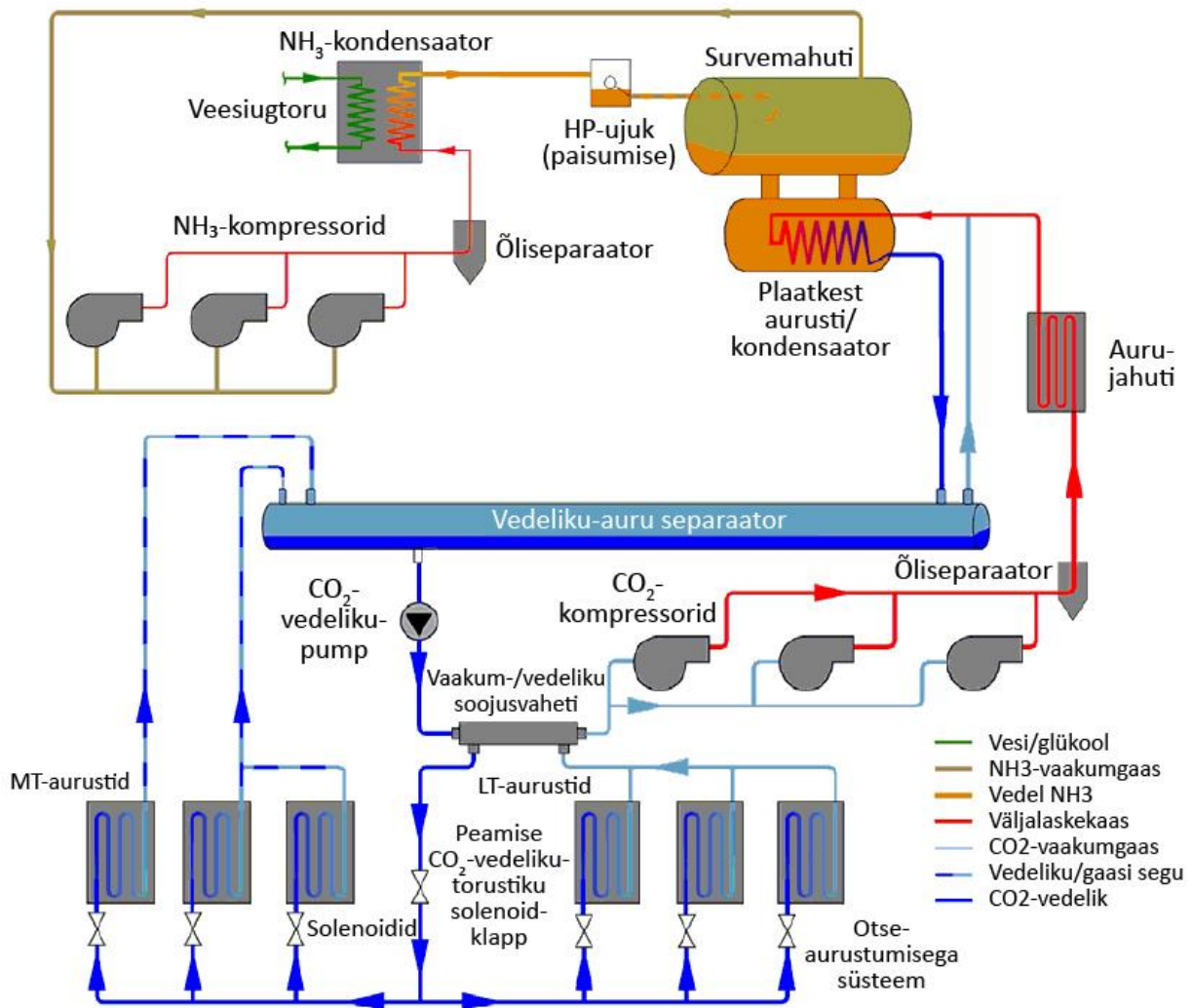
NH₃/CO₂-kaskaadsüsteemid on tegelikult kahe külmaahela kombinatsioon ühes süsteemis. NH₃-süsteemi aurusti on ühtlasi CO₂-ahela kondensaator. CO₂-süsteem võib olla iseenesest üheastmeline (ainult külmutus) või ka kaheastmeline (nii külmutus kui ka jahutus). Süsteemi lisakeerukus kompenseeritakse väiksemate osadega CO₂-madalatemperatuuriliste rakenduste jaoks.



Joonis 23. NH₃/CO₂-kaskaadsüsteem

CO₂/NH₃-kaskaadsüsteemis kasutatakse ühe tonni jahutamiseks vähem energiat võrreldes teiste külmutusseadmetega täiskoormusel, kuid osalisel koormusel võib erinevus olla veelgi suurem, eriti aurustumistemperatuuridel –37 °C kuni –50 °C. Kui madalatemperatuurilistes rakendustes kasutada ammoniaagi asemel CO₂, kasutatakse ära CO₂ unikaalsed füüsilised omadused, tänu millele saab kasutada väiksemaid torusid, väiksemaid pumpe ja vähem isolatsiooni ning väheneb isoleerimistöõde mahukus võrreldes kaheastmeliste ammoniaagisüsteemidega.

CO₂/NH₃-kaskaadsüsteem võimaldab projekteerijatel piirata ammoniaagi täitekogust seadmeruumis. Töötlemis- ja/või hoiustamisel on ainult CO₂. Suurte madalatemperatuuriliste külmutusseadmete puhul võib ammoniaagi täitekoguse vähenemine olla märkimisväärne ning madalamad temperatuurid (ja suurem jõudlus) on saavutatavad väiksemate investeeringute ja väiksemate kasutuskuludega kui tavapäraste külmutusseadmete puhul.



Joonis 24. Kombineeritud pump- ja otseaurustumisega NH₃/CO₂-süsteem



Sellel skeemil ei edastata kondensaatorist välja voolavat NH₃-vedelikku kõrgrõhu ressiivrisse, mis on tavaline suuremate NH₃-süsteemide ja standardsete HFC-süsteemide puhul. NH₃-külmaaine täitekoguse vähendamiseks võib vedeliku paisutada otse niinimetatud survemahutisse. Survemahutis tingimused küllastatakse ja vedel NH₃ lastakse tilkuda alla kaskaadsoojusvahetisse, mis tagab kondenseerimise CO₂-süsteemi jaoks. Kuna energia kantakse CO₂-lt üle NH₃-le, siis vedel NH₃ läheb keema ja gaas tõuseb ise survemahuti pinnale. NH₃-kompressorid tõmbavad selle gaasi survemahuti pinnalt ära ja edastavad selle otse NH₃-kondensaatorisse.

4.2.4. R717-süsteemi hooldus

Üldine hooldus

Hoidke külmaaine tarve võimalikult väike. Süsteemis mitteolev külmaaine ei saa ka lekkida. Hästi läbimõeldult projekteeritud külmutusseade koos sobivate seadmete valikuga ja isolatsiooniventilide kasutamisega vähendab külmaaine väljavoolu hooldus- ja remonditööde ajal.

Lekkevõimaluse minimeerimiseks tuleb kasutada hästi tihendavaid komponente. Regulaarselt tuleb teha lekkekontrolle. Tuleb valida ühilduvad materjalid, sest muidu võivad tekkida lekkimist soodustavad praod. Näiteks kokkupuutel teatud õlide ja ammoniaagiga võib elastomeeride maht suureneda (paisumine) või väheneda (kahanemine).

Torustik

Kuna ammoniaak on söövitav kokkupuutel värvmetallidega, kasutatakse ammoniaagisüsteemide valmistamiseks tavaliselt süsinikust või roostevabast terasest torusid ja liitmikke. Lekkeohu minimeerimiseks tuleb põhimõtteliselt eelistada keevitühendusi äärikühendustele. Alla 40 mm läbimõõduga torude puhul tuleks põkk-keevituse asemel kasutada otsmuhvliidet.

Tühjendamine

Hooldustöö ajaks tuleb süsteemid üldjuhul tühjaks pumbata – kas siis süsteemi teise osasse või hoiupaaki. Väikese koguse gaasi eemaldamiseks piisab tuulutamisest. Suured süsteemid võivad olla varustatud väljapumpamiseseadmetega:

- auru jaoks üldjuhul kompressor ja kondensaator, mis on võimeline töötama madalal vasturõhul;
- vedeliku jaoks pump.

Õli utiliseerimine

Kuna ammooniaak ja mineraalõli on peaaegu täielikult segunematud, jääb kogu süsteemi alumisele poole sisenev määrdeaine sinna ammoniaagi all oleva õlikihina, v.a juhul, kui



paigaldatakse õlijääkide utiliseerimisseade või kui süsteemist lastakse õli välja. Mõne süsteemi puhul tuleb süsteem aeg-ajalt õlist tühjendada ja süsteem uue õliga täita.

Õli tuleb lasta sobivasse avatud metallanumasse ja seejärel kõrvaldada kasutuselt jäätmekäitluseeskirjade kohaselt. Enne süsteemi tühjendamist õlist pumbake õli alla ja isoleerige korralikult selle süsteemi komponent või sektsioon, mida te õlist tühjendate. Ohutuse tagamiseks on oluline järgida vastavaid tegevusjuhiseid ning toimingu peab tegema vastava kvalifikatsiooniga sertifitseeritud isik.

Lekke tuvastamine

Ammoniaaki on lihtne tuvastada, sest see on tugeva lõhnaga (inimese tajumispiir on 5 ppm = 3,5 mg/m³), mis osutab lekke otsimise vajadusele. Lekked, mis võivad teatud tingimustes jääda mõneks ajaks HFC-tehastes tuvastamata, on ammoniaagitehastes mõeldamatud. Väga väikeseid lekkeid ei saa ammoniaagitehastes (lekke suurus umbes 100 g NH₃/a) lõhna järgi tuvastada, sest ammoniumi kontsentratsioon 5 ppm jääb saavutamata.

R717 lekkeid saab tuvastada järgmisi meetodeid kasutades:

- visuaalne kontroll, näiteks õliplekid;
- lekke tuvastamise pihusti;
- sobiv elektrooniline lekkedetektor – elektrokeemiline andur (mõeldud väikese ammoniumi kontsentratsiooni tuvastamiseks (50 ppm kuni 500 ppm), poolkonduktorandurid, Pellistori (või katalüütiline) andur, infrapuna tuvastussüsteem;
- fenoolftaleiinpaber.

Gaasi levimine ja andurite paigutus:

- gaasiandurite arv ja paigutus töökohal oleneb töökoha suuruselt ja seadmete arvust. Üldjuhul katab üks andur umbes 36 m² suuruse ala;
- prioriteet tuleb anda kohtadele, mis on kompressorivõllide tihendite ja vedelikupumpade lähedal. Üldjuhul tuleks ammoniaagiandur paigutada seadme kohale, kuid vedelikulekke tuvastamiseks tuleks ammoniaagipumbaga installatsioonides paigutada üks andur allapoole, pumpade lähedale;
- seadmeruumis võib osutada vajalikuks paigaldada ka mitu andurit, kuid vähemalt üks andur peab sobima madala tasemega häire tuvastamiseks;
- survetoru kaitseventiilis olev andur võib jälgida lekkeid või käivitumist. Võib kasutada ka rõhu seiramissüsteemiga varustatud purunevat membraani.

Veeahelate jälgimine ammoniaagilekete suhtes

- Kooskõlas standardiga EN 378 tuleb külmutusseadmete puhul, kus kasutatava külmaaine kogus on üle 500 kg, võtta meetmed külmaaine olemasolu tuvastamiseks kõikides ühendatud vee- või vedelikuahelates;

- tuleb vältida ammoniaagi sattumist kanalisatsioonisüsteemi või aurukondensaatori jahutusvette;
- praegu on kõige sagedasem mõõtmisüsteem pH-väärtuse jälgimine. Ammoniaagilekke korral veeahelas pH-väärtus tõuseb. pH-väärtuse erinevuse mõõtmiseks soovitame paigaldada automaatse temperatuurikompenseerimisega soojusvaheti sisse- ja väljalaskesüsteemi vahele seadme. pH-taseme häire korral tuleb soojusvaheti lülitada vee ja ammoniaagi poolel mootoriga ventiilide abil või käsitsi välja. Uuemad ioonselektiivsed mõõteseadised on palju täpsemad;
- teine võimalus on kasutada ammoniaagitundlikku elektroodi. Sel juhul ei ole vaja erinevust mõõta.

4.3.Süsivesinikud

Osoonikihti mittekahandavad ja ülimaldala GWP-ga süsivesinike rühm (HC-d) ei moodusta atmosfääris mingeid kõrval- ega lagunemissaadusi. Enim kasutatud süsivesinikud on külmutusseadmetes propaan (R290), propeen (R1270) ja isobutaan (R600a).

4.3.1. Põhiomadused

Kuna süsivesinikupõhised külmaained on tuleohtlikud, kuuluvad need ohutusklassi A3, mis tähendab, et need on väikese toksilisusega, kuid kergesti süttivad. Süsivesinikele kohalduvad sageli rangemad ohutusnõuded asustatud ruumides lubatud koguste suhtes. See võimaldab kasutada süsivesinikke peamiselt integreeritud süsteemides, jahutites ja mõnedes jaotatud õhukonditsioneerimise süsteemides.

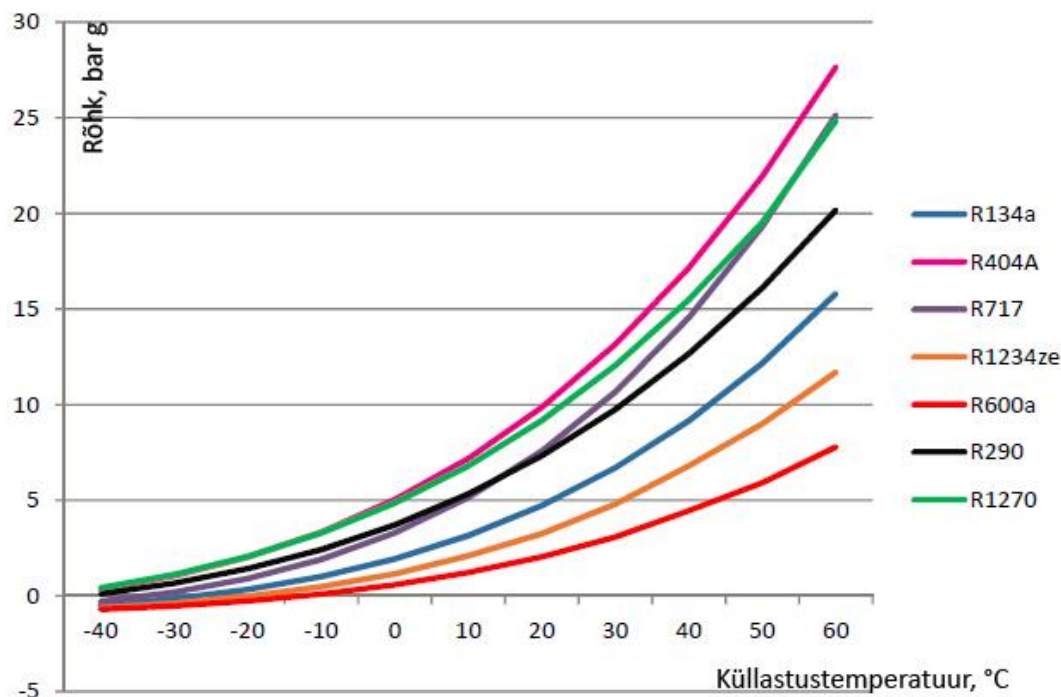
Süsivesinikupõhiseid külmaaineid saab kasutada kas spetsiaalselt nende kasutamiseks konstrueeritud süsteemides või asendusena HFC põhiste külmaainetele mõeldud süsteemides. Tänu sellele on need hinna poolest konkurentsivõimelised lahendused. Kui süsivesinikupõhist külmaainet soovitakse kasutada süsteemis, mis on mõeldud teist tüüpi külmaaine jaoks, on ühilduvuse tagamiseks vaja teha tõenäoliselt muudatusi. Arvesse tuleb võtta määrdeaine ühilduvust ja süsivesinike tuleohtlikkusega seotud tegureid. Süsivesinikupõhiste külmaainete suurim potentsiaal on siiski uutes süsteemides.

Süsivesinikupõhised külmaained ühilduvad täielikult peaaegu kõikide määrdeainetega, mida külmutus- ja õhukonditsioneerimissüsteemides tavapäraselt kasutatakse. Üks peamine erand selles reeglis on silikooni ja silikaati sisaldavad määrdeained (lisandid, mida tavaliselt kasutatakse vahutamistavastaste ainetena).

Rõhk ja temperatuur

R290 ja R1270 on samasuguse tööjõudluse ja töö rõhuga kui R404A ning neid kasutatakse kõrge-, keskmise- ja madalatemperatuurilistes kaubanduslikes külmutusseadmetes. R600a

küllastustemperatuur on palju kõrgem kui teistel külmaainetel ja see töötab vaakumiga enamiku süsteemide alumises astmes. Selle kasutamine piirneb koduste ja väga väikeste kaubanduses kasutatavate külmutusseadmetega, mis lekivad minimaalselt ja mille tõttu juhtub harva lekkest tulenevat õhu ja niiskuse sattumist süsteemi.



Joonis 25. Rõhk - temperatuur, madala ja keskmise rõhu külmaained

Materjalide koostõju

Materjalidega erilisi probleeme ei ole. Erinevalt ammoniaagist sobivad ka vaskmaterjalid, mis tähendab, et võib kasutada poolhermeetilisi ja hermeetilisi kompressoreid. Otsene materjaliühilduvus on vähem problemaatiline kui HFC-de ja POE õlide puhul. Mineraalõli, polüoolesterõli ja alküülbensen on kõik kasutatavad, kuid külmaaine lahustuvus õlis on suur; arvestada tuleb määrimisega.

Efektiivsus

Süsteemid, milles kasutatakse süsivesinikke on sageli energiatõhusamad kui need, milles kasutatakse HFC-sid. Külmutusseadmete energiatõhususe võrdlemisel tuleb arvestada paljude teguritega, kuid paljud erinevad uuringud osutavad looduslike külmaainete kasutatavate süsteemide suuremale energiatõhususele mitmes sektoris, näiteks:

- **eluruumide õhukonditsioneerimine:** Itaalia tootja DeLonghi annab teada, et süsivesinikepõhised tubased kliimaseadmed on 5–10% võrra efektiivsemad kui samaväärsed HFC-de põhised seadmed;
- **mobiilne õhukonditsioneerimine:** mõõtmistulemused näitavad, et süsivesinikud on 10–35% võrra efektiivsemad kui HFC-d;
- **õhukonditsioneerimine:** 2008. aastal tehtud aurukompressiooniga külmutusseadme uurimus näitas, et R290 ja R600a segu energiatõhusus oli võrreldes R12-ga kuni



25,1% võrra suurem madalatel temperatuuridel ja 17,4% võrra suurem kõrgematel temperatuuridel. Uurimuse kohaselt oli R134a vähem efektiivne kui R12;

- **kaubanduses kasutatavad toiduainete külmutusseadmed:** Ühendkuningriigi firma Foster annab teada, et looduslikel külmaainetel töötavad autonoomsed seadmed vähendavad energiatarvet kuni 15% võrra.

Suurenenud energiatõhususest annavad teada ka paljud lõppkasutajad, näiteks:

- **Unilever** – võrreldes HFC-de põhiste külmikutega vähendab süsivesinikupõhiste jäätisekülmikute kasutamine energiakulu 9% võrra;
- **McDonald's** – restoranis, kus kasutatakse ainult looduslikke külmaaineid, vähenes energiakulu 19 kuni 32% võrra;
- **Waitrose** – süsivesinikega jahutatud veeahelaga vitriinide kasutamine vähendas energiakulu 20% võrra;
- **PepsiCo & Red Bull** – energiakulu vähenemine 45% võrra tänu süsivesiniku kasutamisele ja müügiautomaatide tehnilisele täiustamisele.

Süsivesinikud kui külmaained

R600a-ga seotud projekteerimiserinevused tulenevad selle suurest tuleohtlikkusest ning väga madalast rõhust ja mahust:

- täitekogus on piiratud (alla 150 g, R600a on klassifitseeritud A3-rühma külmaainena);
- mõned elektrilised osad on konstrueeritud kasutamiseks tuleohtlikus keskkonnas. See kehtib mõõdukalt tuleohtlike külmaainete kohta, nagu 600a;
- tüüpiline maksimaalne süsteemi rõhk (PS) kõrgema astme jaoks on 6,8 bar ja tüüpiline PS alumise astme jaoks on 3,3 bar, mis tähendab, et osad ja torustikud võib dimensioneerida oluliselt madalama rõhu jaoks kui teiste HFC-de puhul;
- külmatootlikkus on umbes 50% R134a omast ning COP on väga sarnane. Seega on kompressoril suurem surverõhk, et tagada sama külmatootlikkus, kuid sama suurusega mootor. Kui R600a jaoks vajalikud kompressorid on laialdaselt saadaval koduste ja väikeste kaubanduses kasutatavate süsteemide jaoks, siis suuremate süsteemide jaoks neid ei ole.

R290 ja R1270 on samasuguse rõhu, temperatuuri suhte ja külmatootlikkusega kui R404A. Peamine erinevus konstruktsioonis tuleneb nende kahe külmaaine suurest tuleohtlikkusest:

- täitekogus on piiratud (alla 150 g, R290 ja R1270 on klassifitseeritud A3-rühma külmaainena);
- mõned elektrilised osad on konstrueeritud kasutamiseks tuleohtlikus keskkonnas. See kehtib mõõdukalt tuleohtlike külmaainete kohta, nagu R290 ja R1270;

Tüüpiline maksimaalne süsteemi rõhk (PS) on:

- kõrgema astme jaoks 18,1 bar R290 puhul ja 21,8 bar R1270 puhul;
- alumise astme jaoks 10,4 bar R290 puhul ja 12,7 bar R1270 puhul.



Tavaliselt kasutatakse R404A-komponente R290 ja R1270-ga süsteemides, v.a elektriseadmed.

4.3.2. Kasutusvaldkonnad

Peamised sektorid, kus kasutatakse süsivesinikke, on:

- kodumajapidamisseadmed ja väikesed kaubanduslikud külmutusseadmed (nt jahutid, külmikud);
- soojuspumbad;
- kaubanduslikud külmutusseadmed (supermarketid);
- tööstuslikud külmutusseadmed: erikasutus (protsessid).

Süsivesiniku kasutamist piirab väike täitekogus (alla 150 g). Tavaliselt kasutatakse neid väikestes suletud süsteemides turvariski minimeerimiseks.

4.3.3. HC-süsteemide hooldus

Lekke tuvastamine

Süsivesinike lõhn ei ole piisavalt tugev, et seda saaks kasutada usaldusväärse indikaatorina lekke tuvastamiseks. Madala rõhulise osa kontrollimisel peab süsteem olema välja lülitatud (rõhku vähendamata). Näiteks on temperatuuril -30 °C aurustuva R290-süsteemi töö rõhk 0,6 bar, kuid ooterežiimil temperatuuril 20 °C on rõhk 7,4 bar.

Süsivesiniku lekkeid saab tuvastada järgmisi meetodeid kasutades:

- visuaalne kontroll;
- lekke tuvastamise pihusti;
- sobiv tuleohtlike gaaside elektrooniline lekkedetektor.

Oluline on teada, et kohtades, kus kasutatakse elektroonilisi lekkedetektoreid tuleohtlike külmaainete (näiteks R600a, R290 ja R1270) keskkonnas, on need kasutamiseks ohutud ja piisavalt tundlikud ka külmaaine tuvastamiseks. Paljud HFC-de tuvastamiseks kasutatavad elektroonilised lekkedetektorid ei ole ohutud kasutamiseks tuleohtlike külmaainetega.

Turvaline töökeskkond

Tuleohtlike külmaainetega töötades peab ala olema:

- hea ventilatsiooniga;
- ilma tuleallikateta 3 m ulatuses (tüüpiline ohuala tuleohtlike külmaainetega töötamisel).



Vajaduse korral paigaldatakse sundventilatsioon, kasutades sobivat ventilaatorit. Sellel peab olema Ex-tähisega tiivikumootor ja 5 m kaabel, mis võimaldab selle lülitamist väljaspool ohtlikku tööala.

Süsteemiga töötamisel või lekkekahtluse korral kontrollige ja jälgige tööala HC-detektori abil. Oluline on tagada, et detektorit ei saaks nullida taustal olevate tuleohtlike külmaainete tasemeteni ning et see annaks häiret madalama tuleohtlikkuse taseme 20% väärtuse juures. Ka tulekustuti peab olema käepärast. See peab olema vähemalt 2 kg mahuga pulberkustuti või samaväärse mahuga CO₂-kustuti.

Seadmed

Tuleohtlike külmaainetega võib kasutada teatud standardseid tööriistu ja seadmeid, sh mõõtekollektoreid.

Enamikku standardseid vaakumpumpasid saab ohutult kasutada, sest tavaliselt on ainus potentsiaalne süttimisallikas sisse-väljalüliti. Lisaks hajub pumbaga väljalastav tuleohtlik külmaaine tavaliselt ohutult ega moodusta tuleohtlikku ala, eeldusel et pump asub hea ventilatsiooniga kohas.

Kuna tuleohtlike külmaainete utiliseerimiseks ei saa standardseid utiliseerimisseadmeid ohutult kasutada, nende kasutamine on keelatud. Erinevalt vaakumpumpadest on nendel mitu süttimisallikat (nt sisse-väljalülitid, releed, rõhulülitid). Lisaks tekitab leke seadme ümber tuleohtliku ala. Kuna neid ohte ei ole võimalik vältida, tuleb kasutada utiliseerimise osas nimetatud õiget utiliseerimisseadet.

Kuna enamus HFC ja HCFC jaoks kasutatavatest elektroonilistest lekkedetektoritest ei ole ohutud ja tundlikud tuleohtlike külmaainetega kasutamiseks, tuleb kasutada spetsiaalselt tuleohtlike gaaside jaoks mõeldud elektroonilisi detektoreid (või lekke tuvastamise pihustit).

Tühjendamine

Tuleb veenduda, et vaakumpumba sisse-väljalüliti oleks selle ainus süttimisallikas. Sel juhul võib vaakumpumba kasutada ohutult tuleohtliku külmaainega, kui sisse-väljalülitit ei kasutata:

- seadke lüliti sisselülitatud asendisse ja ühendage pump toitepesasse väljaspool 3 m ala ning juhtige pumba ekspluatatsiooni sellest pesast;
- pange vaakumpump hea ventilatsiooniga alale või välistingimustesse.

Utiliseerimine

Tuleohtlik külmaaine tuleb utiliseerida sobiva utiliseerimisseadme abil, näiteks Care Saver (standardse halogeensüsivesiniku tüüpi külmaaine utiliseerimisseadme kasutamine ei ole lubatud).



- Õhu eemaldamiseks enne tuleohtliku külmaainega täitmist tühjendage utilisaatorsilinder.
- Ärge segage utilisaatorsilindris tuleohtlikke külmaaineid teist tüüpi külmaainetega.
- Süsivesinikupõhiste külmaainete utiliseerimisel ärge täitke utilisaatorsilindreid üle 45% HFC ohutust mahust.
- Tähistage utilisaatorsilinder näitamaks, et see sisaldab tuleohtlikku ainet.

Lahtijootmine

Ühenduskohtade ohutuks lahtijootmiseks:

- jälgige ala pidevalt tuleohtliku külmaaine detektori abil;
- tagage hea loomulik või sundventilatsioon;
- eemaldage tuleohtlik külmaaine süsteemist (vt utiliseerimisprotseduuri) ja veenduge, et süsteem oleks täielikult tühjendatud;
- laske utiliseerimisseadmel piisavalt kaua töötada, et süsteem oleks vaakumis ja võimalikult palju külmaainet saaks süsteemist eemaldatud;
- täitke süsteem hapnikuvaba kuiva lämmastikuga kuni rõhuni 0,1 bar;
- ühendage süsteem ventilatsioonitorustikuga ja avage see õhu juurdepääsuks;
- jootke ühendused lahti.

Jootmine

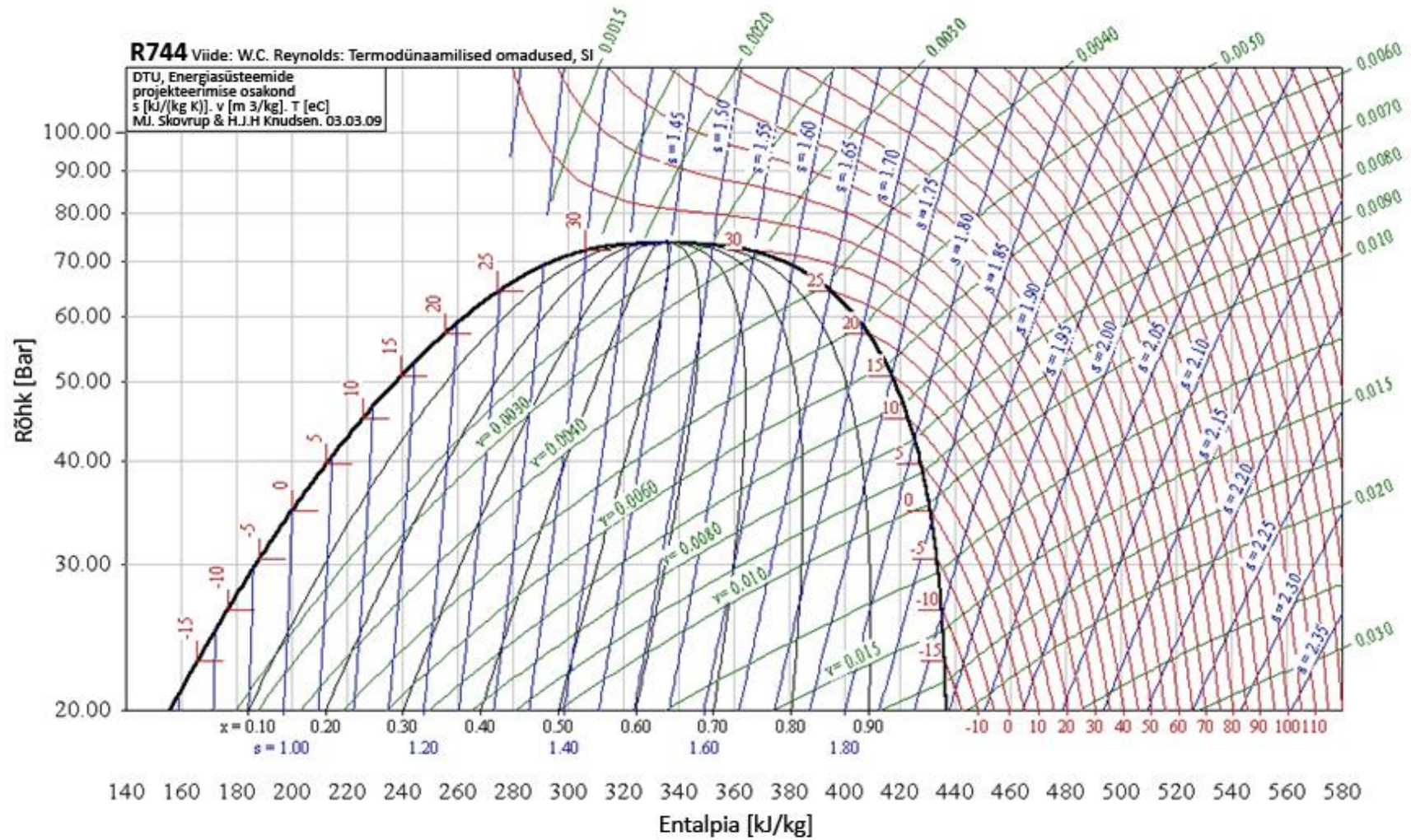
Ühenduskohtade ohutuks jootmiseks:

- jälgige ala pidevalt tuleohtliku külmaaine detektori abil;
- tagage hea loomulik või sundventilatsioon;
- ühenduste lahtijootmisel tagage süsteemile vähemalt üks õhule avatud ligipääsupunkt ja puhastage kuiva lämmastikuga.

Täitmine

- Tagage hea loomulik või sundventilatsioon.
- HC puhul – kasutage külmaaineks mõeldud HC-d, ärge kasutage LPG-/küttegaasi.
- Kui täitetorustikud ei ole tühjendatud, puhastage need hoolikalt (avades ja seejärel sulgedes silindri ventiili enne puhastamist).
- Ärge täitke süsteemi üle (näiteks HC täitekogus on umbes 45% samaväärse HFC-süsteemi täitekogusest).
- Kriitilise täitekogusega süsteemide täitmisel tuleb külmaaine täpselt kaaluda. Üldjuhul on lubatud kõrvalekalle $\pm 5\%$. Ärge kohandage külmaaine täitekoguseid, järgige alati tootja määratud kogust.

LISA 1. R744 p-h diagramm



LISA 2. R744-süsteemide rakendus p-h-diagrammi näitel

