

Jäähdytysjärjestelmien
ENERGIALASKENTAOPAS

12.9.2011

ESIPUHE

SISÄLLYSLUETTELO

1	YKSINKERTAINEN LASKENTAMENETELMÄ.....	5
2	YKSITYISKOHTAINEN LASKENTAMENETELMÄ	8
2.1	LASKENTAPERIAATE	8
2.2	JÄÄHDYTYSENERGIAN TUOTON KYLMÄKERTOIMET	9
2.2.1	Kylmäkertoimen määritelmät.....	9
2.2.2	Kompressorikylmälaitos	11
2.2.3	Vapaajäähdytys.....	14
2.2.4	Kaukojäähdytys.....	16
2.2.5	Absorbtiójäähdytys.....	17
2.3	JÄÄHDYTYSENERGIAN SIIRTO-JA JAKELUHÄVIÖT	17
2.3.1	Ilmapuolen häviöt	17
2.3.2	Vesipuolen häviöt.....	18
2.4	APULAITTEIDEN SÄHKÖNKULUTUS.....	19
2.4.1	Energian tarve.....	19
2.4.2	Vesiverkoston pumppausenergia	20
2.4.3	Huonelaitteiden sähkönkulutus.....	21

LÄHTEET

ESIMERKKI 1
ESIMERKKI 2
ESIMERKKI 3

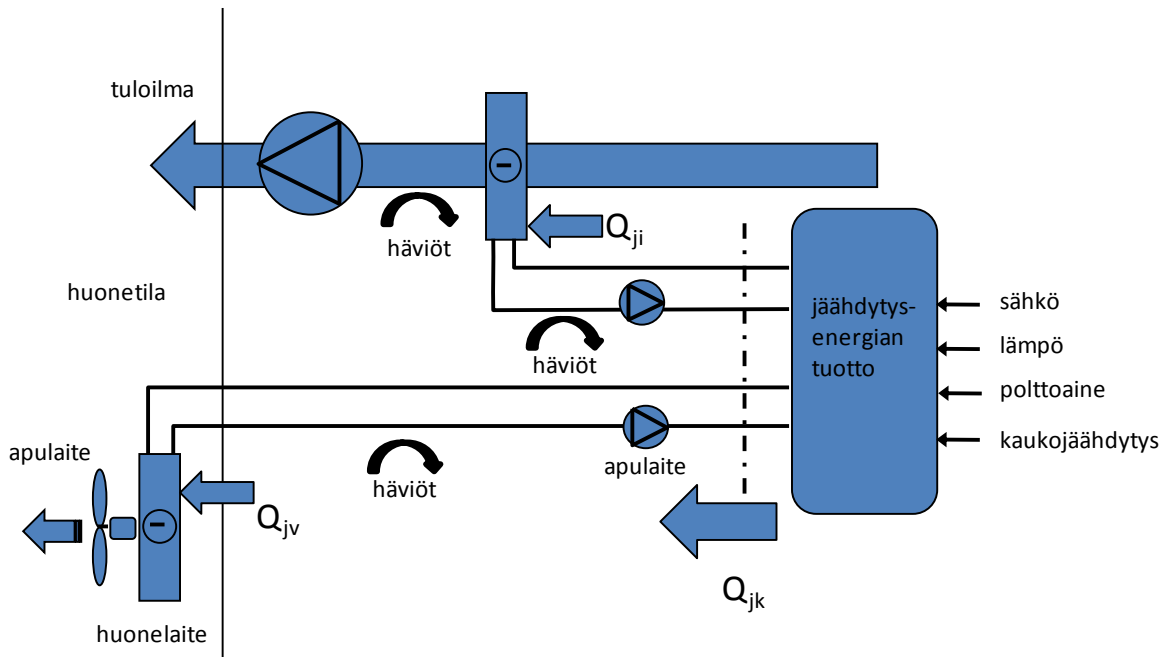
JOHDANTO

Tämä opas käsittelee rakentamismääräyskokoelman ohjeen (D5 2012) jäähdytysjestelmien energialaskentaa. Laskentaopas on kaksiosainen, sisältäen yksinkertaisen laskentamenetelmän sekä yksityiskohtaisen laskentamenetelmän. Yksinkertainen laskentamenetelmä on suuntaa antava vuositasen menetelmä joka tukeutuu suuruusluokkia kuvaaviin taulukkoarvoihin.

Yksityiskohtaisessa menetelmässä lähtökohtana on rakennuksen jäähdytysenergian nettotarve, jonka laskenta tapahtuu tavanomaisella rakennuksen energiasimuloinnilla ja jonka kuvaaminen ei sisälly tähän oppaaseen. Järjestelmälaskennassa käytetään tuntitasen laskentaa, joka ottaa yksinkertaista menetelmää tarkemmin huomioon järjestelmän ominaisuuksia ja käyttöä ja jolla on mahdollista päästä parempaan arvioon järjestelmän energiankulutuksesta kuin yksinkertaisella menetelmällä. Yksityiskohtaisessa menetelmässä on myös mahdollista käyttää taulukoitujen ohjearvojen asemesta laitekohtaisia suoritusarvoja, mikä on suositeltavaa ja lisää laskettujen tulosten luotettavuutta.

1 YKSINKERTAINEN LASKENTAMENETELMÄ

Rakennuksen tilojen jäähdyttämiseen käytettävä jäähdytysenergia tuodaan tiloihin joko ilmavirran avulla tai vesivirran avulla tai käyttäen molempia tapoja samanaikaisesti, kuva 1. Jäähdytysjärjestelmän energiankulutus koostuu jäähdytysenergian tuoton (kompressorilaitos, jäähdytystorni tmv.) energiankulutuksesta sekä apulaitteiden sähkönkulutuksesta.



Kuva 1 Jäähdytysjärjestelmän periaatekuva

Jäähdytysjärjestelmän käyttämä vuotuinen energiankulutus arvioidaan ilmanvaihdon tai ilmastoinnin jäähdytyspatterin vuotuisen jäähdytysenergiaan Q_{ji} , huonelaitteiden jäähdytysenergiaan Q_{jv} sekä jäähdytysjärjestelmän ominaisuuksiin perustuen. Mainitut vuosienenergiat lasketaan tilojen jäähdytysenergiantarpeen laskennan yhteydessä, tarkoitukseen soveltuvalla energiasimulointiohjelmalla enintään tunnin pituisia aika-askelta käyttäen. Jäähdytysjärjestelmällä tuotettu vuotuinen jäähdytysenergia Q_{jk} on

$$Q_{jk} = (1 + \beta_{hji})Q_{ji} + (1 + \beta_{hjv})Q_{jv} \quad (1)$$

- Q_{ji} ilmastointikoneen jäähdytyspatterin käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia, kWh/a
- Q_{jv} huonelaitteiden käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia, kWh/a
- β_{hji} järjestelmän ilmapuolen (termiset, kondenssi ym.) häviöt huomioon ottava kerroin
- β_{hjv} järjestelmän vesipuolen (termiset) häviöt huomioon ottava kerroin.

Lasketattavasta (ohjelmasta) riippuen ilmastointikoneen jäähdytyspatterin käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia sisältää jäähdytyspatterilla tapahtuvan ilman kosteuden kondensoitumiseen tarvittavan jäähdytysenergian (märkä patteri) tai ei sisällä sitä (kuiva patteri). Tämä täytyy huomioida taulukon 2 häviökertoimien käytössä. Jos jäähdytyspatterin käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia sisältää kosteuden kondensoitumiseen tarvittavan energian, käytetään sitä taulukon 2 kertoimen β_{hji} arvoa joka ei sisällä kondensoitumisen vaikutusta. Jos toisaalta kondensoituminen ei sisällä jäähdytyspatterin käyttämään energiaan, se täytyy huomioida kertoimella joka sisältää kondensoitumisen.

Sähköä jäädytysenergian tuottamiseen käytävälle järjestelmälle vuotuinen sähköenergiantarve lasketaan kaavalla

$$W_{\text{jäädytys}} = \frac{Q_{jk}}{\varepsilon_E} \quad (2)$$

ε_E jäädytysenergian tuotto prosessin vuotuinen kylmäkerroin, -.

Vastaavasti lämpö- tai kylmäenergiaa jäädytysenergian tuottamiseen (sorptiojäädytys tai kaukojäädytys) käytävälle järjestelmälle vuotuinen energiantarve lasketaan kaavalla

$$Q_{\text{jäädytys}} = \frac{Q_{jk}}{\varepsilon_Q} \quad (3)$$

ε_Q jäädytysenergian tuotto prosessin vuotuinen kylmäkerroin.

Jäädytysenergian tuotto prosessin vuotuinen kylmäkerroin määritellään prosessilla vuosittain tuotetun jäädytysenergian suhteena ko. prosessiin vuosittain käytetyn energiaan määrään. Tuotto prosessiin käytettävään energiaan sisältyy tällöin mm. lauhdutinkiertoon käytettävä pumppausenergia, lauhduttimen puhallinenergia, jäädytystornin puhallinenergia ym. jäädytys prosessin välittömästi käyttämä energia.

Vuotuisille kylmäkertoimille on esitetty ohjearvoja taulukossa (1) ja häviökertoimille taulukossa (2). Ohjearvon tilalla voidaan myös käyttää muita, yksityiskohtaisemmillä menetelmillä luotettavasti määritettyjä suoritusarvoja.

Taulukko 1 Jäädytysenergian tuotto prosessin vuotuisia kylmäkertoimia

Jäädytysenergian tuottotapa	ε_E	ε_Q
Kompressori-kylmälaite , ilmalauhdutteen	2,5	-
Kompressori-kylmälaite ,vesilauhdutteen	3	-
Vapaajäädytys, liuosjäädytin (kuiva)	5	-
Vapaajäädytys, jäädytystorni (märkä)	7	-
Vapaajäädytys, maaputkisto (vertikaalinen)	30	-
Split laitteet	3	-
Kaukojäädytys (lämmönsiirrin)	-	1
Absorptiojäädytys	-	0,7

Taulukko 2

Jäähdytyksen häviökertoimen ohjearvoja

Jäähdytyksen menoveden lämpötila	$\beta_{hji}^{1)}$	$\beta_{hji}^{2)}$	β_{hvj}
7 C	0,3	0,6	0,2
10 C	0,2	0,5	0,15
15 C	0,1	0,2	0,1
18 C	0,0	0,0	0,0

1) ei sisällä kondenssihäviötä

2) sisältää kondenssihäviön

Kun rakennuksessa käytettävä jäähdytysenergia tuotetaan kahdella eri prosessilla, esim. vapaajäähdytyksellä ja sitä täydentävällä kompressorisyksiköllä, järjestelmän vuotuinen energiankulutus lasketaan kaavalla

$$W_{\text{jäähdytys}} = \alpha_1 \frac{Q_{jk}}{\varepsilon_{E1}} + \alpha_2 \frac{Q_{jk}}{\varepsilon_{E2}} \quad (4)$$

α_1 tuotto prosessilla 1 tuotetun vuosittaisen jäähdytysenergian suhteellinen osuus,

α_2 tuotto prosessilla 2 tuotetun vuosittaisen jäähdytysenergian suhteellinen osuus,

($\alpha_1 + \alpha_2 = 1,0$)

ε_{E1} tuotto prosessin 1 vuotuinen kylmäkerroin,

ε_{E2} tuotto prosessin 2 vuotuinen kylmäkerroin.

Edellisen lisäksi järjestelmät käyttävät sähköä pumppujen, puhaltimien ym. apulaitteiden toimintoihin jäähdytyksen luovutus- ja jakelutoimintojen yhteydessä. Apulaitteiden sähkönkulutukseen lasketaan jäähdytysenergian jakeluun tarvittava pumppausenergia sekä jäähdytysenergian luovutuksen tehostamiseen käytettävä energia, esim. puhallinkonvektorin puhallinenergia. Apulaitteiden sähkönkulutukseen ei lasketa ilmanvaihdon tai ilmastoinnin ilman siirtämiseen käyttämää puhallinenergiaa eikä jäähdytysenergian tuotto prosessin yhteydessä käytettävää energiaa. Apulaitteiden sähkönkulutus riippuu järjestelmän tyypistä ja se lasketaan kaavalla

$$W_{\text{jäähd.apu}} = \beta_{\text{apu}} Q_{jk} \quad (5)$$

β_{apu} järjestelmän vuotuinen apulaitteiden sähkönkulutuksen kulutuskerroin

Kulutuskertoimelle on esitetty ohjearvoja taulukossa (3). Ohjearvon tilalla voidaan aina käyttää yksityiskohtaisemmalla menetelmällä laskettuja arvoja.

Taulukko 3 Jäähdytyksen apulaitteiden sähkönkulutuksen kulutuskertoimen ohjearvoja

Jäähdytysjärjestelmä	β_{apu}
Vesijärjestelmä, jäähdytyspalkki	0,06
Vesijärjestelmä, puhallinkonvektori	0,08
Ilmajärjestelmä, IMS järjestelmä	0,05

2 YKSITYISKOHTAINEN LASKENTAMENETELMÄ

2.1 LASKENTAPERIAATE

Rakennuksen tilojen jäähdyttämiseen tarvittava jäähdytysenergian nettotarve on voimakkaasti vuodenajasta ja vuorokaudenajasta riippuva ilmiö, jonka määrittäminen tapahtuu parhaiten simuloimalla. Jäähdytysjärjestelmän vuotuinen energiantarve lasketaan lähtien rakennuksen tilojen jäähdytysenergian nettotarpeesta. Tiloissa tarvittavan nettoenergian tuotossa, varastoinnissa, jakelussa ja luovutuksessa tapahtuu aina häviöitä. Jäähdytysenergiaa voidaan myös tuottaa ulkoilman, vesistön tai maaperän kylmää hyödyntämällä. Näin jäähdytysjärjestelmän käyttämän energian määrä poikkeaa tiloihin tuotavasta nettoenergiasta sekä määrältään että laadultaan.

Seuraavassa esitetyllä laskentamenetelmällä voidaan määrittää jäähdytysjärjestelmän käyttämän energian tarve yksityiskohtaisemmin kuin luvun 2 vahvasti yksinkertaistetulla menetelmällä. Ilmastoinnin jäähdytyspatteriin tuotava jäähdytysenergia sekä huonelaitteisiin tuotava jäähdytysenergia oletetaan lasketuksi dynaamisesti muun jäähdytyslaskennan yhteydessä ja näin ollen tunnetuiksi. Jäähdytysenergian nettotarve jakautuu ilmanaviston kautta tilaan tuotavaan osuuteen sekä vesiverkoston kautta tuotavaan osuuteen. Laskennan periaatteena on ensin määrittää jäähdytysjärjestelmän käyttämä energia vuoden kunakin tuntina ja lopuksi laskea yhteen koko vuoden aikana käytettävä energia. Näin sähköä käyttävän järjestelmän vuosienenergia on

$$W_{\text{jäähdytys}} = \sum_{8760} w_{\text{jäähdytys}} \quad (6)$$

$w_{\text{jäähdytys}}$ järjestelmän käyttämä sähköenergia laskentatunnin aikana, kWh.

Tuntitasolla järjestelmän käyttämä energia saadaan lisäämällä ilmastointikoneelle sekä huonelaitteisiin tuotavaan energiaan järjestelmän häviöt sekä jakamalla jäähdytysenergian tuoton kylmäkertoimella seuraavasti

$$w_{\text{jäähdytys}} = \frac{q_{ji} + q_{jv} + \Delta q_{hi} + \Delta q_{hv}}{\varepsilon_E} \quad (7)$$

q_{ji} ilmastointikoneen jäähdytyspatterin käyttämä jäähdytysenergia laskentatunnin aikana, kWh

q_{jv} huonelaitteiden käyttämä jäähdytysenergia laskentatunnin aikana, kWh

Δq_{hj} ilmapuolen häviöt laskentatunnin aikana, kWh

Δq_{hv} vesipuolen häviöt laskentatunnin aikana, kWh

ε_E jäähdytysenergian tuotto prosessin kylmäkerroin laskentatunnin aikana.

Vastaavasti lämpö- tai kylmäenergiaa käyttävän järjestelmän (sorptiojäähdytys tai kaukojäähdytys) vuotuinen energiantarve lasketaan kaavalla

$$Q_{\text{jäähdytys}} = \sum_{8760} q_{\text{jäähdytys}} \quad (8)$$

$q_{\text{jäähdytys}}$ järjestelmän käyttämä lämpö- tai kylmäenergia laskentatunnin aikana kWh.

Tuntitason energia saadaan tässä vastaavasti kuin edellä, mutta vaihtamalla kylmäkerroin lämpö- tai kylmäenergiaa käyttävän järjestelmän kylmäkertoimeksi

$$q_{\text{jäähdytys}} = \frac{q_{ji} + q_{jv} + \Delta q_{hi} + \Delta q_{hv}}{\varepsilon_Q} \quad (9)$$

ε_Q jäähdytysenergian tuotto-prosessin kylmäkerroin laskentatunnin aikana.

Edellisen lisäksi jäähdytysjärjestelmät käyttävät sähköä pumppujen, puhaltimien ym. apulaitteiden toimintoihin jäähdytyksen luovutus- ja jakelutoimintojen yhteydessä. Apulaitteiden sähkönkulutukseen lasketaan jäähdytysenergian jakeluun tarvittava pumppausenergia sekä jäähdytysenergian luovutuksen tehostamiseen käytettävä energia, esim. puhallinkonvektorin puhallinenergia. Apulaitteiden sähkönkulutukseen ei lasketa ilmanvaihdon tai ilmastoinnin ilman siirtämiseen käyttämää puhallinenergiaa eikä luonnollisestikaan jäähdytysenergian tuotto-prosessin yhteydessä käytettävää energiaa. Apulaitteiden sähkönkulutus riippuu järjestelmän tyypistä ja se lasketaan samalla tavoin ensin vuoden jokaiselle tunnille ja sitten summaamalla vuoden tunnit yhteen

$$W_{apu} = \sum_{8760} w_{apu} \quad (10)$$

w_{apu} järjestelmän käyttämä apulaitteiden sähköenergia laskentatunnin aikana kWh.

2.2 JÄÄHDYTYSENERGIAN TUOTON KYLMÄKERTOIMET

2.2.1 Kylmäkertoimen määritelmät

Jäähdytyslaitteiston kylmäkerroin voidaan määrittellä useilla eri tavoilla: hetkellisenä, nimellistehoa vastaavana, osatehoa vastaavana sekä kausikylmäkertoimena. Edellä, yhtälössä (7) esiintyvä jäähdytysenergian tuotto-prosessin kylmäkerroin laskentatunnin aikana määritellään seuraavasti

$$\varepsilon_E = \frac{\Phi_{tu}}{P_{tu}} \quad (11)$$

ε_E jäähdytysenergian tuoton hetkellinen (laskentatunnin toimintaolosuhteita vastaava) kylmäkerroin

Φ_{tu} jäähdytysyksikön tuottama kylmäteho W

P_{tu} jäähdytysyksikön käyttämä sähköteho (sisältäen kompressorit, ilmalauhduttimien puhaltimet, tuottoyksikön pumput) W

Aina ei kuitenkaan ole käytettävissä laskentatunnin kuormitusta ja toimintaolosuhteita

vastaavaa hetkellistä kylmäkerrointa, vaan esimerkiksi laitteiston nimellistehoa vastaava kylmäkerroin joka on

$$\varepsilon_{En} = \frac{\Phi_{tun}}{P_{tun}} \quad (12)$$

ε_{En} jäädytysenergian tuoton hetkellinen kylmäkerroin nimellisteholla
 Φ_{tun} jäädytysyksikön tuottama kylmäteho laitteiston nimellisteholla W
 P_{tun} jäädytysyksikön käyttämä sähköteho laitteiston nimellisteholla (sisältäen kompressorit, ilmalauhduttimien puhaltimet, tuottoyksikön pumput) W.

Tällöin voidaan kyseisen tilanteen kuormitusta (osatehoa) vastaava kylmäkerroin saada kertomalla nimellistehon kylmäkerroin osatehokertoimella

$$\varepsilon_E = r_{ot} \varepsilon_{En} \quad (13)$$

ε_E jäädytysenergian tuoton hetkellinen kylmäkerroin
 ε_{En} jäädytysenergian tuoton hetkellinen kylmäkerroin nimellisteholla
 r_{ot} osatehokerroin (Taul. 5).

Jos osatehoa vastaavat kylmäkertoimet tunnetaan suoraan laitteiston suoritusarvojen perusteella, näitä arvoja on luonnollisesti suositeltavaa käyttää ensisijaisesti. Muussa tapauksessa voidaan käyttää jäljempänä esitettyjä taulukkoarvoja.

Kylmäkerroin voidaan myös määritellä keskimääräisenä kylmäkertoimena vastaten jotain sovittua ajanjaksoa. Näin esimerkiksi keskimääräinen kylmäkerroin vuositasolla on jäädytysyksikön vuoden aikana tuottama kylmäenergia jaettuna vastaavana ajanjaksona käytetyllä sähköenergialla

$$\bar{\varepsilon}_E = \frac{Q_{tuv}}{E_{tuv}} \quad (14)$$

$\bar{\varepsilon}_E$ jäädytysenergian tuoton vuosikylmäkerroin
 Q_{tuv} jäädytysyksikön tuottama kylmäenergia vuoden aikana kWh
 E_{tuv} jäädytysyksikön käyttämä sähköenergia vuoden aikana kWh.

Vuosikylmäkerrointa voidaan yhtälössä (7) käyttää suoraan laskentatunnin hetkellisen kylmäkertoimen asemesta laskettaessa kyseisen vuoden aikana käytettyä energian määrää. Edellä esitettyä voidaan myös soveltaa yhtälöön (9) kun käyttöenergiana kylmäprosessissa on lämpöenergia, sillä erotuksella että ε_E tilalla käytetään ε_Q .

Erilaisia, lähinnä kompressorikylmälaitoksia koskevia kylmäkertoimia on kansainvälisissä standardeissa ja muissa yhteyksissä määriteltynä lukuisa joukko. Seuraavassa taulukossa on luonnehdinta muutamasta Euroopassa yleisesti käytössä olevasta kertoimesta.

Taulukko 1 Jäädytysenergian tuoton kylmäkertoimien kuvauksia

Lyhenne	Nimitys	Lähde	Kuvaus
EER	Energy Efficiency Ratio	EN-14511	Hetkellinen kylmäkerroin
EIR	Energy Input Ratio	EN-15243	Hetkellisen kylmäkertoimen

SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio	EN-15243	käänteisluku EIR=1/EER Vuosikylmäkerroin
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio	Eurovent	Vuosikylmäkerroin

On huomattava että taulukon 1 hetkellinen kylmäkerroin EER vastaa tiettyjä standardissa EN-14511 määriteltyjä koeolosuhteita sekä laitteiston nimellistehoa, eikä näin ollen sovellu suoraan käytettäväksi. Sitä on tuntitason laskentaa varten korjattava lämpötilojen sekä kuormituksen osalta jäljempänä esitetyllä tavalla. Sen sijaan vuosikylmäkerroin SEER, määriteltynä yhtälön (14) esittämällä tavalla soveltuu periaatteessa suoraan käytettäväksi tuntitason laskentaan. Tällöin jokaisen laskenatunnin kylmäkerroimen arvona käytetään samaa vuosikylmäkerroimen arvoa. Vuosikylmäkerroin ESEER, jota Eurovent käyttää sertifioitujen laitteiden suorituskyvyn mittarina, soveltuu sekin tuntitason laskentaan. Koska ESEER perustuu yhden tietyn (eurooppalaisen) kuormitusprofiilin oletukseen ja lasketaan neljää eri kuormituspistettä vastaavista EER arvoista tiettyjä vakiokertoimia käyttäen, sen arvo voi jossain määrin poiketa todellisesta vuosikylmäkerroimesta. Tarkempaan tulokseen päästään tekemällä laitteiston suorituskykyarvoihin perustuva kylmäkerroimen sovite ja käyttämällä sitä laskentaan [Zweifel 2009].

2.2.2 Kompressorikylmälaitos

Kompressorikylmälaitoksessa jäähdytysenergia tuotetaan kompressorien avulla. Kylmäteho siirretään tilaan joko jäähdyttämällä välittömästi tuloilmaa tai jäähdyttämällä ensin vettä, jolla edelleen voidaan jäähdyttää tuloilmaa tai joka voidaan johtaa tilassa olevaan huonelaitteeseen. Kylmälaitos käyttää jäähdytysenergian tuottamiseen tavallisesti sähköä, josta suurin osa tarvitaan kompressoreille. Laitoksessa on kompressoriyksikön lisäksi tavallisesti lauhdutusosan ilmankiertoa tehostavia puhaltimia sekä nestepiireissä kiertopumppuja. Kompressorilaitoksen kylmäkerroimen arvoon vaikuttavat pääasiallisesti höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat, laitteiston tyyppi sekä kylmäaine. Ohjearvoja jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroimille on seuraavissa taulukoissa. Ohjearvon tilalla voidaan myös käyttää laitekohtaiseen suoritusarvotietoon perustuvia arvoja.

Taulukko 2 Ohjearvoja jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroimille vesilauhdutteisille jäähdyttimille. [EN 15243]

Kylmäaine	Lauhdutus- veden läm- pötilat °C	Jäähdyte- tyn veden lämpötila °C	Keskimää- räinen höy- rystymis lämpötila °C	Mäntä ja scroll kompressorit 10 – 1500 kW	Ruuvi	Turbo-
					kompressorit 200 – 2000 kW ϵ_E	kompressorit 500 – 8000 kW ϵ_E
R134a	27/33	6	0	4,0	4,5	5,2
		14	8	4,6	5,3	5,9
	40/45	6	0	3,1	2,9	4,1
		14	8	3,7	3,7	4,8
R407C	27/33	6	0	3,8	4,2	-
		14	8	4,4	4,9	-

		6	0	3,0	2,7	-
	40/45	14	8	3,6	3,3	-
R410A	27/33	6	0	3,6	-	-
		14	8	4,2	-	-
	40/45	6	0	2,8	-	-
		14	8	3,3	-	-
R717	27/33	6	0	-	4,6	-
		14	8	-	5,4	-
	40/45	6	0	-	3,1	-
		14	8	-	3,7	-

Taulukko 3 Ohjearvoja jäähdytysenergian tuoton kylmäkertoimille ilmalauhdutteisille jäähdyttimille kun ulkoilman lämpötila on 32 °C. [EN 15243, DIN V 18599-7]

Kylmäaine	Jäähdytetyn veden lämpötila °C	Keskimääräinen höyrystymislämpötila °C	Mäntä ja scroll	Ruuvi kompressorit
			10 – 1500 kW ϵ_E	200 – 2000 kW ϵ_E
R134a	6	0	2,8	3,0
	14	8	3,5	3,7
R407C	6	0	2,5	2,7
	14	8	3,2	3,4
R410A	6	0	2,4	-
	14	8	3,1	-
R717	6	0	-	3,2
	14	8	-	3,9

Taulukko 4 Ohjearvoja jäähdytysenergian tuoton kylmätoimille ilmalauhdutteisille kaappikoneille, split, multi-split sekä VRF järjestelmille [EN 15243]

Jäähdytysteho < 12 kW	ϵ_E
Kaappikone, ikkuna tai seinäasennus	2,6
Split järjestelmä	2,7
Multi-split järjestelmä	2,9
Jäähdytysteho > 12 kW	
VRF muuttuvalla kylmäaineen massavirralla	3,5

Yllä esitetyt kylmäkertoimen taulukkoarvot vastaavat laitteiston nimellistehoa sekä tiettyjä

toimintalämpötilojen arvoja. Jos laskentatunnin aikana laitteisto käy vain osateholla tai jos toimintalämpötilat poikkeavat oleellisesti taulukkoarvoista, pitää kylmäkertoimeen tehdä korjaus. Taulukoidun kylmäkertoimen korjaus vallitsevia toimintalämpötiloja vastaavaksi tehdään yhtälöllä

$$\varepsilon_E = \varepsilon_{ET} \frac{T_{kh\ddot{o}}}{T_{kla} - T_{kh\ddot{o}}} \frac{T_{klaT} - T_{kh\ddot{o}T}}{T_{kh\ddot{o}T}} \quad (15)$$

ε_E jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroin toimintapisteessä
 ε_{ET} jäähdytysenergian tuoton taulukoitu kylmäkertoimen ohjearvo
 $T_{kh\ddot{o}}$ kylmäaineen höyrystymislämpötila toimintapisteessä K
 T_{kla} kylmäaineen lauhtumislämpötila toimintapisteessä K
 $T_{kh\ddot{o}T}$ taulukkoarvoa vastaava kylmäaineen höyrystymislämpötila K
 T_{klaT} taulukkoarvoa vastaava kylmäaineen lauhtumislämpötila K.

Jos kylmäaineen lämpötilojen sijaan tunnetaan höyrystimessä ja lauhtuttimessa kiertävän väliaineen eli liuoksen tai ilman lämpötilat, käytetään tarvittavien kylmäaineiden lämpötilatasojen arviointiin höyrystimen ja lauhtuttimen asteisuutta. Asteisuus on keskimääräinen lämpötilaero höyrystimessä tai lauhtuttimessa. Sen arvo on tyypillisesti 5-10 K, riippuen mitoituksesta ja siitä onko kyseessä vesi tai ilma. Asteisuutta käyttäen kylmäaineen lämpötilat saadaan seuraavasti:

$$T_{kh\ddot{o}} = T_{vh\ddot{o}} - \Delta T_{h\ddot{o}} \quad (16)$$

$$T_{kla} = T_{vla} + \Delta T_{la} \quad (17)$$

$T_{vh\ddot{o}}$ väliaineen (liuos, ilma) keskimääräinen lämpötila höyrystimessä °C
 $\Delta T_{h\ddot{o}}$ höyrystimen asteisuus K
 T_{vla} väliaineen (liuos, ilma) keskimääräinen lämpötila lauhtuttimessa °C
 ΔT_{la} lauhtuttimen asteisuus K.

Kylmäkertoimeen vaikuttaa myös se, käytetäänkö laitosta täydellä teholla vai osateholla. Joillakin laitostyypeillä kylmäkerroin pienenee osateholla, kun taas joillakin se kasvaa. Osatehokäytössä nimellistehoa vastaava kylmäkerroin täytyy vielä kertoa osatehokertoimella r_{ot} joka voi saada arvoja väliltä noin $0,5 \leq r_{ot} \leq 1,5$ riippuen laitoksen tyyppistä sekä osatehon säätötavasta [EN 15243]. Parhaiten osatehon vaikutus huomioidaan käyttäen laitekohtaisia arvoja, laskemalla kullekin laskentatunnilla oma osatehokerroin sekä kertomalla sillä kunkin tunnin nimellisarvoa vastaava kylmäkerroin. Yksinkertaisempi mutta karkeampi lähestymistapa on käyttää taulukon 5 keskimääräisiä osatehokertoimia.

Taulukko 5 Keskimääräisiä osatehokertoimia kompressorijäähdytyslaitteistoille [EN 15243]

Vesijäähdytteiset kompressorijäähdyttimet	r_{ot}	Ilmajäähdytteiset kompressorijäähdyttimet	r_{ot}
Mäntä tai scroll kompressorin on-	0,92	Mäntä tai scroll kompressorin on-	1,32

off säädöllä		off säädöllä ja varastosäiliöllä	
Mäntä tai scroll kompressori monivaihesäädöllä (vähintään neljä säätöporrasta)	1,26	Mäntä tai scroll kompressori monivaihesäädöllä (vähintään neljä säätöporrasta)	1,43
Mäntäkompressori jossa yksittäisten sylinterien deaktivointi	0,79	Ruuvikompressorit venttiilinsäädöllä	1,14
Mäntä tai scroll kompressori kuumakaasu ohituksella	0,56	Ilmajäähdytteiset tilojen jäähdytykseen käytettävät yksiköt	
Ruuvikompressori venttiilinsäädöllä	0,97	Yksivyojykejärjestelmä on-off säädöllä	1,24
Turbo kompressori sisäänvirtauksen kuristussäädöllä	1,21	Monivyojykejärjestelmä on-off säädöllä	0,85
		Yksivyojykejärjestelmä taajuusmuuttaja säädöllä	1,37
		Monivyojykejärjestelmä taajuusmuuttaja säädöllä	1,33

2.2.3 Vapaaäähdytys

Vapaaäähdytyksellä tarkoitetaan tässä yhteydessä ulkoilman, maaperän tai vesistön suoraa käyttöä jäähdytystarkoitukseen. Vapaaäähdytys toteutetaan yleensä jäähdyttämällä kiertonestettä viileällä ulkoilmalla tai pumppaamalla kiertoneste maaperässä tai vesistössä olevan putkiston kautta takaisin rakennukseen. Rakennuksen jäähdyttäminen tuomalla viileää ilmaa suoraan rakennukseen lasketaan myös vapaaäähdytykseksi. Vapaaäähdytyksen yhteydessä kylmän varastoinnilla joko erilliseen varaajaan tai rakennuksen rakenteisiin on tärkeä tehostava vaikutus. Vapaaäähdytyksellä ei välttämättä kyetä aina tuomaan tarvittavaa määrää jäähdytystehoa rakennukseen. Tällöin sitä voidaan täydentää rinnakkaisella avustavalla kompressorikylmäilteistolla.

Kuten edellä, myös vapaaäähdytysyksikön hetkellinen kylmäkerroin on sen tuottaman kylmätehon suhde sen käyttämään sähkötehoon

$$\varepsilon_E = \frac{\Phi_{tu}}{P_{tu}} \quad (18)$$

ε_E jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroin
 Φ_{tu} jäähdytysyksikön tuottama kylmäteho W
 P_{tu} jäähdytysyksikön käyttämä sähköteho (sisältäen tuottoyksikön puhaltimet ja pumput) W

Vapaaäähdytyksen kylmäkerroin saattaa vaihdella voimakkaasti ajan funktiona, riippuen käytetyn kylmänlähteen (ulkoilma, maaperä, vesistö) lämpötilan vaihteluista.

Liuosjäähdytin

Liuosjäähdytin on ulkoilmalla jäähdytetty lämmönsiirrin, jonka nestepuolella virtaa

jäähdytettävä liuos ja ilmapuolen lämmönsiirtoa tehostetaan puhaltimilla. Sen kylmäkertoimeen vaikuttavat voimakkaimmin jäähdytettävän liuoksen lämpötilan ja ulkoilman lämpötilan erotus sekä jäähdyttävän ilmavirran aikaansaamiseen tarvittava puhallinteho. Liuosjäähdyttimen kylmäkerrointa voidaan arvioida yhtälöllä

$$\varepsilon_E = 5 e^{-0,5v} (T_{lm} - T_i) \quad (19)$$

ε_E jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroin

v ilman nopeus lämmönsiirtimen otsapinnalla m/s

T_{lm} jäähdytettävän liuoksen menolämpötila (jäähdyttimelle tuleva liuos) °C

T_i ulkoilman lämpötila °C.

Käytetyt ilman nopeuden arvot ovat tavallisimmin välillä 1-5 m/s, tyypillisesti 2-4 m/s. Suuremmilla ilman nopeuksilla laitteesta tulee kompaktimpi mutta kylmäkerroin on alempi ja pienemmillä nopeuksilla päästään parempiin kylmäkertoimiin. Kylmäkertoimen tarkempi arvo voidaan myös määrittää tuotetiedoista, mikäli sellaiset ovat käytettävissä. Yhtälön (19) kylmäkerroin on itse jäähdyttimelle, jolloin siihen sisältyvät puhallinenergia sekä liuoksen pumppaukseen itse jäähdyttimen läpi tarvittava energia. Muu pumppaukseen tarvittava sähköenergia lasketaan apulaitteiden sähkönkulutukseen.

Jäähdytystorni

Jäähdytystorneista suljetulla kierrolla toteutettu märkä (lämmönsiirtimen ulkopuolinen kastelu vedellä) jäähdytystorni on tehokas ratkaisu. Sen kylmäkertoimeen vaikuttavat jäähdytettävän liuoksen lämpötilan ja ulkoilman märkälämpötilan erotus sekä jäähdyttävän ilmavirran aikaansaamiseen tarvittava puhallinteho. Suljetulla kierrolla toteutetun märän tornin kylmäkerrointa voidaan arvioida samalla yhtälöllä (19) kuin liuosjäähdyttimelle, sillä erolla että nyt ilman lämpötilana käytetään märkälämpötilaa. Koska ilman märkälämpötila on aina muutaman asteen alempi kuin kuivalämpötila, on märän jäähdytystornin jäähdytyspotentiaali aina hieman suurempi kuin kuivana toimivan liuosjäähdyttimen. Erityisesti tällä erolla on merkitystä kun ulkoilman lämpötila on lähellä liuoksen menolämpötilaa.

Kylmäkertoimen tarkempi arvo voidaan myös määrittää jäähdytystornin tuotetiedoista, mikäli sellaiset ovat käytettävissä. Yhtälön (19) kylmäkerroin on itse jäähdyttimelle, jolloin siihen sisältyvät puhallinenergia sekä liuoksen pumppaukseen itse jäähdyttimen läpi tarvittava energia. Muu pumppaukseen tarvittava sähköenergia lasketaan apulaitteiden sähkönkulutukseen.

Vapaajäähdytys, maaputkisto

Vapaajäähdytykseen voidaan myös käyttää maaperän ympäri vuoden suhteellisen alhaisena pysyvää lämpötilaa. Tällöin maaperään sijoitetaan putkisto, jossa virtaa jäähdytettävä liuos. Putkisto voidaan sijoittaa vaakatasoon maan pinnan alle, tai sille voidaan porata pystysuuntainen kaivo johon putket sijoitetaan. Vapaajäähdytys maaputkistoa käyttäen soveltuu erityisen hyvin maalämpöpumpun yhteyteen, koska samaa liuosputkistoa voidaan käyttää sekä lämmitys- että jäähdytystarkoitukseen.

Jos ajatellaan että vapaajäähdytyksen tuottoyksikön muodostavat tässä tapauksessa maaputkisto, siihen yhdistetty lämmönsiirrin jolla kylmä siirretään esim. tuloilmaan sekä liuoksen kierrätyspumppu, tulee jäähdytysenergian tuoton kylmäkertoimeksi aikaisemman mukaan

$$\varepsilon_E = \frac{\Phi_{tu}}{P_{tu}} \quad (20)$$

ε_E jäähdytysenergian tuoton kylmäkerroin
 Φ_{tu} maapiiristä saatava kylmäteho W
 P_{tu} liuoksen pumppaukseen käytettävä sähköteho W.

Maaperässä olevasta putkistosta saatava kylmäteho lasketaan yhtälöllä

$$Q_{tu} = g L (T_{lk} - T_{maa}) \quad (21)$$

g liuosputkiston kohduktanssi pituusyksikköä kohden W/mK
 L liuosputkiston kokonaispituus m
 T_{lk} liuoksen keskilämpötila °C
 T_{maa} maaperän lämpötila °C.

Liuoksen keskilämpötilana käytetään meno- ja paluulämpötilojen keskiarvoa. Maaperän lämpötilaa voidaan arvioida lisäämällä paikkakunnan vuotuisen ulkoilman keskilämpötilaan 1,5 K. Rakennuksen lämmöntarpeen mukaan normaalisti mitoitetulle pystyputkistolle kohduktanssi saa tyypillisesti arvoja väliltä $g = 1...2$ W/mK sekä vaakaputkistolle puolet pystyputkiston arvosta.

Yhtälön (20) nimittäjän pumppausteho lasketaan tavanomaisella tavalla. Tällöin painehäviö lasketaan ottaen huomioon liuosputkien pituuden sekä kytkennän sarjaan tai rinnan. Painehäviöön lasketaan mukaan myös putkiston muut virtausvastukset sekä liuoslämmönsiirtimen painehäviö. Liuoksen tilavuusvirran arvona käytetään pumpun läpi kulkevaa kokonaistilavuusvirtaa.

Vapaajäähdytys ulkoilmalla

Rakennusta voidaan jäähdyttää ilmanvaihto- tai ilmastointilaitosta käyttäen ulkoilmalla. Tämä voi tapahtua kahdella tavalla. Kun rakennuksessa on jäähdytystarvetta ja samalla ulkoilman lämpötila on riittävän alhainen, voidaan ulkoilmaa käyttää tilojen välittömään jäähdyttämiseen. Toisaalta voidaan käyttää ns. yöjäähdytystä, jolloin yöaikana viilennetään rakenteita ulkoilmalla päiväaikaisen sisälämpötilan nousun pienentämiseksi. Jos rakennuksessa ei ole muuta jäähdytyslaitteistoa, yöjäähdytys palvelee leikkaamalla päiväaikaisten lämpötilojen nousua. Jos rakennuksessa on lisäksi koneellinen jäähdytys, yöjäähdytyksen voidaan katsoa säästävän koneellisella jäähdytyksellä tuotettavaa energiaa. Ulkoilmalla tapahtuvan vapaajäähdytyksen jäähdytysenergian tuotto ja samassa yhteydessä käytettävä puhallinenergian tarve voidaan laskea jäähdytyksen nettotarpeen simuloinnin yhteydessä.

2.2.4 Kaukojäähdytys

Kaukojäähdytyksessä jäähdytysenergia tuotetaan keskitetysti suuremmissa yksiköissä ja siirretään asiakkaalle viilennetyn veden avulla. Kaukojäähdytystä voidaan tuottaa käyttäen yhteistuotannon lämpöenergiaa sorptiojäähdytyksen avulla, käyttämällä merivettä tai suuremman kokoluokan lämpöpumppulaitosta. Asiakkaan kannalta kaukojäähdytys merkitsee sitä että varsinainen kylmäenergian tuotanto tapahtuu jossain rakennuksen ulkopuolella ja ainoa prosessi rakennuksessa on jäähdytysenergian siirtäminen lämmönsiirtimellä asiakkaan jäähdytysvesiverkostoon. Tällöin voidaan katsoa että rakennuksessa tapahtuvan prosessin häviöt ovat niin pienet että niitä ei tarvitse tässä

yhteydessä huomioida ja kaukojäähdytyksen ”tuotannon” kylmäkerroin $\varepsilon_Q = 1$.

2.2.5 Absorbtiójäähdytys

Absorbtiójäähdytys perustuu kiertoprosessiin jossa jäähdytysenergiaa tuotetaan lämpöenergian avulla. Tavallisimmin prosessiaineina käytetään H₂O-LiBr paria tai NH₃ – H₂O paria. H₂O-LiBr prosessi voi olla yksivaiheinen, kaksivaiheinen tai kolmivaiheinen. Vaiheiden lukumäärän kasvattaminen nostaa prosessin kylmäkerrointa mutta tekee laitteistosta monimutkaisemman ja edellyttää korkeammassa lämpötilassa olevaa käyttöenergiaa. Vastaavasti NH₃ – H₂O prosessi voi olla yksi tai kaksiportainen. Absorbtiójäähdytys on erityisen edullinen silloin kun on käytettävissä riittävän korkeassa lämpötilassa olevaa ylijäämälämpöä. Absorbtiójäähdytyksen kylmäkerroimia ε_Q on taulukossa 6. Taulukossa on myös prosessiin syötettävän lämpöenergian vaadittu lämpötilataso T_{in} .

Taulukko 6 Ohjearvoja absorbtiojäähdytyksen kylmäkerroimille. [VTT 1926]		
Jäähdytysprosessi	ε_Q	T_{in} °C
H ₂ O-LiBr 1-vaiheinen	0,7	90
H ₂ O-LiBr 2-vaiheinen	1,3	160
H ₂ O-LiBr 3-vaiheinen	1,6	200
NH ₃ – H ₂ O 1-portainen	0,6	100
NH ₃ – H ₂ O 2-portainen	0,7	160

2.3 JÄÄHDYTYSENERGIAN SIIRTO-JA JAKELUHÄVIÖT

2.3.1 Ilmapuolen häviöt

Jäähdytysenergian siirto- ja jakeluhäviöt ilmapuolella koostuvat pääosin kanavistojen ja putkistojen termisistä kylmähäviöistä ympäröiviin tiloihin sekä jäähdytyspatterissa mahdollisesti tapahtuvasta kondenssihäviöstä. Häviöt voidaan laskea seuraavasti [EN 15243]

$$\Delta q_{hi} = \Delta q_{sii} + \Delta q_{koi} + \Delta q_{jai} = [\beta_{sii} + \beta_{koi} + \beta_{jai}] q_{ji} \quad (22)$$

Δq_{hi} jäähdytysenergian siirto- ja jakeluhäviöt laskentatunnin aikana, kWh

Δq_{sii} jäähdytysenergian siirtohäviö, kWh

Δq_{koi} jäähdytyspatterissa tapahtuva kondenssihäviö, kWh

Δq_{jai} jäädytysenergian jakeluhäviö, kWh
 β_{sii} jäädytysenergian siirron häviökerroin
 β_{koi} jäädytyspatterissa tapahtuvan kondensoitumisen häviökerroin
 β_{jai} jäädytysenergian jakelun häviökerroin
 q_{ji} ilmastointikoneen jäädytyspatterin käyttämä jäädytysenergia laskentatunnin aikana, kWh.

Häviökertoimille on esitetty arvoja taulukossa 7.

Taulukko 7 Arvoja ilmapuolen häviökertoimille [EN 15243]

jäädytystapa	β_{sii}	β_{koi}	β_{jai}
vesi 6/12 °C	0,1	0,13	0,05
vesi 14/18 °C	0,1	0,0	0,05
vesi 18/20 °C	0,0	0,0	0,0
suorahöyrystys	0,1	0,13	0,05
vapaajäädytys	0,0..0,1	0,0	0,05

Putkiston tai kanaviston siirtohäviöt voidaan tarvittaessa laskea yllä esitettyä menettelyä tarkemmin perustuen ilmapuolen järjestelmän kanavistojen ja putkistojen pituuteen, niiden eristystasoon sekä jäädytetyn ilman tai veden ja ympäristön väliseen lämpötilaeroon. Tällöin käytetään pyöreälle putkelle tai kanavalle yhtälöä

$$\Delta q_{sii} = \frac{T_{ym} - T_{vä}}{\frac{1}{h_u \pi D_u L} + \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{D_u}{D_s}} \Delta t \quad (23)$$

Δq_{nv} jäädytysenergian siirto- ja jakeluhäviöt laskentatunnin aikana, kWh
 T_{ym} putkiston tai kanaviston ympäristön lämpötila, °C
 $T_{vä}$ putkistossa tai kanavistossa virtaavan ilman tai veden lämpötila, °C
 h_u eristyksen ulkopinnalla vaikuttava lämmönsiirtokerroin, W/m²K
 D_u eristyksen ulkohalkaisija, m
 D_s eristyksen sisähalkaisija eli putken tai kanavan ulkohalkaisija, m
 L laskettavan putkiston tai kanaviston osan pituus, m
 λ eristysmateriaalin lämmönjohtavuus, W/mK
 Δt laskentajakson pituus, 3600s.

Eristyksen ulkopuoliselle lämmönsiirtokertoimelle voidaan käyttää ohjearvona $h_u = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

2.3.2 Vesipuolen häviöt

Jäädytysenergian siirto- ja jakeluhäviöt vesipuolella eli tilojen jäädytyksessä koostuvat pääosin putkistojen termisistä kylmähäviöistä ympäröiviin tiloihin sekä huonelaitteissa mahdollisesti tapahtuvasta kondenssihäviöstä. Häviöt voidaan laskea seuraavasti [EN

15243]

$$\Delta q_{hv} = [\beta_{siv} + \beta_{kov} + \beta_{jav}] q_{jv} \quad (24)$$

Δq_{hv} jäädytysenergian siirto- ja jakeluhäviöt laskentatunnin aikana, kWh

β_{siv} jäädytysenergian siirron häviökerroin

β_{kov} huonelaitteissa tapahtuvan kondensoitumisen häviökerroin

β_{jav} jäädytysenergian jakelun häviökerroin

q_{jv} huonelaitteiden käyttämä jäädytysenergia laskentatunnin aikana, kWh.

Häviökertoimille on esitetty arvoja taulukossa 8.

Taulukko 8 Arvoja vesipuolen häviökertoimille [EN 15243]

jäädytystapa	β_{siv}	β_{kov}	β_{jav}
vesi 6/12 °C	0,0	0,13	0,1
vesi 8/14 °C (esim. puhallinkonvektori)	0,0	0,1	0,1
vesi 14/18 °C (esim. puh.konvektori, induktio)	0,0	0,0	0,0
vesi 16/18 °C (esim. jäädytyskatto)	0,0	0,0	0,0
vesi 18/20 °C (esim. jäädytetyt rakenteet)	0,1	0,0	0,0
suorahöyrytys	0,0	0,13	0,1

Putkiston tai kanaviston siirtohäviöt voidaan tarvittaessa laskea yllä esitettyä menettelyä tarkemmin perustuen ilmapuolen järjestelmän kanavistojen ja putkistojen pituuteen, niiden eristystasoon sekä jäädytetyn ilman tai veden ja ympäristön väliseen lämpötilaeroon. Tällöin käytetään pyöreälle putkelle tai kanavalle yhtälöä (23).

2.4 APULAITTEIDEN SÄHKÖNKULUTUS

2.4.1 Energian tarve

Varsinaisen jäädytysenergian tuotannon lisäksi järjestelmät käyttävät sähköä pumppujen, puhaltimien ym. apulaitteiden toimintoihin jäädytyksen luovutus- ja jakelutoimintojen yhteydessä. Apulaitteiden sähkönkulutukseen lasketaan vesipuolen jäädytysenergian jakeluun tarvittava pumppausenergia sekä huonelaitteissa jäädytysenergian luovutuksen tehostamiseen käytettävä energia, esim. puhallinkonvektorin puhallinenergia. Apulaitteiden sähkönkulutukseen ei lasketa ilmanvaihdon tai ilmastoinnin ilman siirtämiseen käyttämää puhallinenergiaa eikä jäädytysenergian tuottoprosessin yhteydessä käytettävää energiaa. Koko järjestelmän apuenergian tarve lasketaan yhtälöllä

$$w_{apu} = \sum w_{pu} + \sum w_{hu} \quad (25)$$

w_{apu} jäädytysjärjestelmän apuenergia lasketatunnin aikana, kWh

Σw_{pu} järjestelmän pumppujen yhteenlaskettu pumppausenergia laskentatunnin aikana, kWh
 Σw_{hu} järjestelmän huonelaitteiden yhteenlaskettu apuenergia laskentatunnin aikana, kWh.

2.4.2 Vesiverkoston pumppausenergia

Kunkin laskentatunnin aikana jäähdytysveden pumppaamiseen tarvittava energia lasketaan yhtälöllä

$$w_{pu} = \frac{\Delta p_{pu} V}{\eta_{pu}} t \quad (26)$$

w_{pu} jäähdytysveden pumppausenergia laskentatunnin aikana, kWh
 Δp_{pu} pumpattavan piirin maksimi painehäviö, kPa
 V pumpun läpi kulkeva tilavuusvirta, m³/s
 η_{pu} pumpun hyötysuhde paine-eroa ja tilavuusvirtaa vastaavassa toimintapisteessä
 t laskentatunnin pituinen ajanjakso, 1 h.

Pumpattavan piirin maksimi painehäviö saadaan yhtälöstä

$$\Delta p_{pu} = R L_{max} (1 + z) + \Delta p_{tuo} + \Delta p_{sv} + \Delta p_{kay} \quad (27)$$

Δp_{pu} pumpattavan piirin maksimi painehäviö, kPa
 R piirin painehäviö pituusyksikköä kohden, kPa/m
 L_{max} piirin pisimmän haaran pituus, m
 z kertavastusten suhteellinen osuus piirin painehäviöstä
 Δp_{tuo} lämmönsiirtimen painehäviö jäähdytysenergian tuotantopäässä, kPa
 Δp_{sv} säätöventtiilin painehäviö, kPa
 Δp_{kay} lämmönsiirtimen painehäviö jäähdytysenergian luovutuskohteessa, kPa.

Piirin pituusyksikköä kohden ilmaistun painehäviön sekä kertavastusten suhteellisen osuuden ohjearvoina voidaan käyttää taulukon 9 arvoja. Jos näille suureille on olemassa tarkemmat arvot tai jos piirin painehäviö tunnetaan tarkemmin muun painehäviölaskennan kautta, on suositeltavaa käyttää näitä arvoja ohjearvojen asemesta.

Taulukko 9 Jäähdytyspiirin painehäviö/pituus sekä kertavastusten suhteellinen osuus [EN 15243]

Painehäviö pituusyksikköä kohden kPa/m	0,25
Kertavastusten suhteellinen osuus	0,30

Suorakaiteen muotoiselle rakennukselle jäähdytyksen jakeluun käytettävän vesiputkiston maksimipituus voidaan arvioida yhtälöllä

$$L_{\max} = 2 \left(L + \frac{B}{2} + h_k n_k + 10 \right) \quad (28)$$

L_{\max} piirin pisimmän haaran pituus, m

L rakennuksen pituus, m

B rakennuksen leveys, m

h_k keskimääräinen kerroskorkeus

n_k kerrosten lukumäärä.

Lämmönsiirtimien painehäviöille voidaan käyttää taulukon 10 ohjearvoja. Jos painehäviöille on tiedossa tarkemmat arvot, on suositeltavaa käyttää niitä ohjearvojen asemesta.

Taulukko 10 Jäähdytyspiirin komponenttien painehäviön ohjearvoja [EN 15243]

Komponentti	Painehäviö kPa
Jäähdytysenergian tuotanto	
Levyhöyrystin	40
Putkihöyrystin	30
Lauhdutin	45
Jäähdytystorni	35
Jäähdytysenergian luovutus	
Ilmastoinnin jäähdytyspatteri	35
Induktiolaite	35
Jäähdytyskatto	35
Puhallinkonvektori	35
Säätöventtiili	30

2.4.3 Huonelaitteiden sähkönkulutus

Huonelaitteiden sähkönkulutus on jäähdytysjärjestelmään kuuluvien paikallisten puhaltimien sähkönkulutusta. Huonelaitteiden sähkönkulutuksen voidaan olettaa olevan verrannollinen jäähdytysenergian tuotantoon. Kun tilaan huonelaitteiden käyttämä jäähdytysenergia laskentatunnin aikana tunnetaan, saadaan vastaava huonelaitteiden sähköenergian kulutus

$$w_{hu} = R_{hu} w_{jv} \quad (29)$$

w_{hu} tilan huonelaitteiden sähkönkulutus laskentatunnin aikana, kWh

R_{hu} tehosuhte

w_{jv} huonelaitteiden käyttämä jäähdytysenergia laskentatunnin aikana, kWh.

Taulukossa 11 on annettu ohjearvoja huonelaitteiden tehontarpeen ja jäähdytystehon

väliselle suhteelle. Ohjearvojen tilalla voidaan aina käyttää tarkempia laitekohtaisia arvoja, mikäli sellaisia on saatavana.

Taulukko 11 Ohjearvoja huonelaitteiden ja vastaavan tilaan tuotavan jäähdytystehon suhteelle [EN 15243]

Huonelaite	tehosuhde R_{hu} kW/kW
Suorahöyrystys yksikkö, ilmanjako kanavilla	0,03
Suorahöyrystys yksikkö, katto kaseteilla	0,02
Suorahöyrystys yksikkö, seinä tai sokkeliasennuksella	0,02
Puhallinkonvektori, katto tai sokkeliasennuksella, vesi 6 oC	0,02
Puhallinkonvektori, katto tai sokkeliasennuksella, vesi 14 oC	0,035
Puhallinkonvektori, ilmanjako kanavilla, vesi 14 oC	0,04

LÄHTEET

DIN V 18599-7, 2007. Energy efficiency of buildings — Calculation of the energy needs, delivered energy and primary energy for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting — Part7: Delivered energy for air handling and air conditioning systems for non-residential buildings.

Eurovent Standard 6-C003-2008: Rating Standard for Liquid Chilling Packages; EUROVENT CERTIFICATION, F-75003 PARIS.

Koljonen T. ja Sipilä K., Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. VTT tiedotteita 1926. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1998.

SFS EN-14511-1, 2008. Lämmitykseen ja jäähdytykseen tarkoitetut, sähkökäyttöisellä kompressorilla toimivat huoneilmastointikoneet, nestejäähdyttimet ja lämpöpumput. Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 15243, 2008. Rakennusten ilmastointi. Ilmastoitujen rakennusten huonelämpötilojen sekä lämpökuormien ja energiantarpeen laskenta. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Zweifel G., A simple chiller model for hourly time step applications. Proceedings of Building Simulation 2009, s. 420-427.

ESIMERKKI 1

Lähtötiedot:

Rakennuksen tarvitsema jäähdytysenergia tuotetaan ilmalauhdutteisella kompressorikylmälaitoksella. Tilajäähdytys tapahtuu jäähdytyspalkkien avulla. Energiasimuloinnilla on selvitetty että ilmastointikoneen jäähdytyspatterin käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia Q_{ji} on 14374 kWh (sisältäen kondenssihöviön) ja huonelaitteiden käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia Q_{jv} on 86750 kWh.

Laskenta:

Asetetaan jäähdytyksen menoveden lämpötiloiksi ilmastointikoneelle +7 °C ja huonelaitteille +15 °C. Valitaan tämän perusteella taulukosta 2 jäähdytysjärjestelmän ilmapuolen häviökertoimen arvoksi $\beta_{hji} = 0,3$ ja vesipuolen häviökertoimen arvoksi $\beta_{hju} = 0,1$.

Jäähdytysjärjestelmällä tuotettu vuotuinen jäähdytysenergia Q_{jk} on yhtälön (1) mukaan

$$Q_{jk} = (1+0,3)14374 + (1+0,1)86750 = 114111 \text{ kWh / a.}$$

Valitaan taulukosta 1 ilmalauhdutteista kylmälaitosta vastaavan jäähdytysenergian tuottoprosessin vuotuisen kylmäkertoimen arvoksi $\epsilon_E = 2,5$. Vuotuinen jäähdytysjärjestelmän sähköenergiantarve $E_{j\ddot{a}r}$ on yhtälön (2) mukaan

$$E_{j\ddot{a}r} = 114111 / 2,5 = 45644 \text{ kWh / a.}$$

Valitaan taulukosta 3 järjestelmän vuotuiseksi apulaitteiden sähkönkulutuksen kulutuskertoimeksi, $\beta_{apu} = 0,06$, jolloin yhtälön (5) mukaan apulaitteiden sähkönkulutukseksi tulee

$$E_{apu} = 0,06 * 114111 = 6847 \text{ kWh / a.}$$

Jäähdytykseen tarvittavan sähköenergian kokonaismääräksi tulee

$$E_{j\ddot{a}r} + E_{apu} = 45644 + 6847 = 52491 \text{ kWh / a.}$$

ESIMERKKI 2

Lähtötiedot:

Rakennuksen tilojen jäähdytysenergia tuotetaan kahdella eri prosessilla. Tilojen jäähdytyksessä käytetään vapaajäähdytystä ja sen lisäksi ilmalauhdutteista kompressorikylmälaitosta. Ilmanvaihdon jäähdytyksessä käytetään vain kompressorikylmälaitosta. Tilajäähdytys tapahtuu jäähdytyspalkkien avulla.

Rakennus on sama kuin esimerkissä 1. Ilmastointikoneen jäähdytyspatterin käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia Q_{ji} on 14374 kWh (sisältäen kondenssihöviön) ja huonelaitteiden käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia Q_{jv} on 86750 kWh.

Jäähdytyksen menoveden lämpötila ilmastointikoneelle on + 7 °C ja tilojen menoveden lämpötilalle käytetään arvoa + 18 °C.

Tehdyn energiasimuloinnin mukaan tilojen jäähdytysenergiasta voidaan tuottaa vapaajäähdytyksellä 75%. Loput 25% tilajäähdytyksen energiasta tuotetaan kompressorilaitteistolla.

Laskenta:

Valitaan taulukosta 2 jäähdytysjärjestelmän ilmapuolen häviökertoimen arvoksi $\beta_{hji} = 0,3$ ja vesipuolen häviökertoimen arvoksi $\beta_{hiv} = 0,0$.

Kompressorilaitteistolla ilmastointikoneen tarpeeseen tuotettu vuotuinen jäähdytysenergia on yhtälöä (1) soveltaen

$$Q_{jk,ilmastointi} = (1+0,3)14374 = 18686 \text{ kWh / a.}$$

Valitaan taulukosta 1 ilmalauhdutteisen kylmälaitoksen jäähdytysenergian tuottoprosessin vuotuisen kylmäkertoimen arvoksi 2,5. Ilmastointikoneen jäähdytysenergian tuottamiseen tarvittava sähköenergia on yhtälön (2) mukaan

$$E_{jär,ilmastointi} = 18686 / 2,5 = 7474 \text{ kWh / a.}$$

Tilojen jäähdytykseen tuotettu vuotuinen jäähdytysenergia on yhtälöä (1) soveltaen

$$Q_{jk,tilat} = (1+0,0)86750 = 86750 \text{ kWh / a.}$$

Valitaan taulukosta 1 vapaajäähdytyksen energian tuottoprosessin vuotuisen kylmäkertoimen arvoksi $\epsilon_{E1} = 5$ ja ilmalauhdutteisen kylmälaitoksen jäähdytysenergian tuottoprosessin vuotuisen kylmäkertoimen arvoksi $\epsilon_{E2} = 2,5$. Kun vapaajäähdytyksen suhteellinen osuus on 75 % ja kompressorijäähdytyksen 25 %, saadaan yhtälön (4) mukaan

$$E_{jär,tilat} = 0,75 (86750 / 5) + 0,25 (86750 / 2,5) = 13012 + 8675 = 21687 \text{ kWh / a.}$$

Valitaan taulukosta 3 järjestelmän vuotuiseksi apulaitteiden sähkönkulutuksen kulutuskertoimeksi, $\beta_{apu} = 0,06$, jolloin yhtälöä (5) soveltaen apulaitteiden sähkönkulutukseksi tulee

$$E_{apu} = 0,06 * (18686 + 86750) = 6326 \text{ kWh / a.}$$

Jäähdytykseen tarvittavan sähköenergian kokonaismääräksi tulee

$$E_{jkkok} = E_{jär,ilmastointi} + E_{jär,tilat} + E_{apu} = 7474 + 21687 + 6326 = 35487 \text{ kWh / a.}$$

ESIMERKKI 3

Lähtötiedot:

Rakennuksen tilojen jäähdytysenergia tuotetaan kahdella eri prosessilla. Tilojen jäähdytyksessä käytetään vapaajäähdytystä ja sen lisäksi ilmalauhdutteista kompressorikylmälaitosta lämpötilahuippujen leikkaamiseen. Ilmanvaihdon jäähdytyksessä käytetään vain kompressorikylmälaitosta. Tilajäähdytys tapahtuu jäähdytyspalkkien avulla. Jäähdytyksen menoveden lämpötilat ovat ilmastointikoneelle +7 °C ja huonelaitteille +17 °C. Vapaajäähdytykseen käytetään märkää jäähdytystornia. Jäähdytystornissa ilman nopeus lämmönsiirtimen otsapinnalla on 3 m/s. Jäähdytystornille palaavan liuoksen lämpötila on sisälämpötilan tavoitearvo vähennettynä jäähdytyspalkkien asteisuudella joka on 4 K. Tilojen sisäilman lämpötilan tavoitearvo on asetettu Sisäilmastoluokituksen 2008 mukaan liukuvaksi seuraamaan ulkolämpötilan arvoa.

Ilmajäähdytteisen kompressorilaitoksen nimellisteho on 300 kW, se toimii scroll-kompressoreilla, kylmäaineena R407C. Lauhtumislämpötilaksi on asetettu 40 °C.

Kompressoreja säädetään on on-off säädöllä, lisäksi piirissä on jäähdytysveden varastosäiliö.

Energiasimuloinnilla on selvitetty ilmastointikoneen jäähdytyspatterin käyttämä jäähdytysenergia sekä huonelaitteiden käyttämä vuotuinen jäähdytysenergia tuntitasolla. Lisäksi tilajäähdytyksen osalta simuloinnin tuloksena saadaan eriteltynä vapaajäähdytyksen sekä kompressorijäähdytyksen energiaosuudet.

Tarkastellaan tiettyä laskentatuntia. Energiasimulointi antaa kyseiselle tunnille seuraavat lähtöarvot: ilmastointikoneen jäähdytyspatterin käyttämä jäähdytysenergia laskentatunnin aikana, $q_{ji} = 20$ kWh sekä huonelaitteiden käyttämä jäähdytysenergia laskentatunnin aikana, $q_{jv} = 100$ kWh. Lisäksi tiedetään että tilajäähdytyksessä on laskentatunnin aikana ollut käytössä ainoastaan vapaajäähdytys. Ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus laskentatunnin aikana ovat $T_u = 17$ °C ja $\varphi = 40$ %.

Laskenta:

Lasketaan vapaajäähdytyksen kylmäkerroin yhtälön (3.2.9) mukaan. Annettujen tietojen perusteella ulkoilman märkälämpötilaksi tulee $T_{im} = 10$ °C. Jäähdytystornille tulevan liuoksen lämpötilaksi saadaan $T_{im} = 17$ °C kun vähennetään sisälämpötilan tavoitearvosta $T_s = 25$ °C jäähdytyspalkkien asteisuus 4 K. Yhtälön (3.2.9) mukaan tulee vapaajäähdytyksen kylmäkertoimeksi

$$\varepsilon_{Evap} = 5 e^{-1,5} (21-10) = 12,3.$$

Arvioidaan vesipuolen siirto- ja jakeluhäviöt vapaajäähdytykselle yhtälön (3.3.3) mukaan, käyttäen taulukon 3.3.2 kertoimia:

$$\Delta q_{hvv} = (0,0+0,0+0,0) 100 \text{ kWh} = 0,0 \text{ kWh}.$$

Laskentatunnin sähköenergian kulutukseksi tilojen vapaajäähdytykselle tulee yhtälön (3.1.2) mukaan

$$e_{järvap} = \frac{q_{jv} + \Delta q_{hvv}}{\varepsilon_{Evap}} = \frac{100 + 0,0}{12,3} = 8,1 \text{ kWh}$$

Valmistaja ilmoittaa kompressorilaitoksen vuosikylmäkertoimelle arvon ESEER = 3,3.

Käytetään tätä kylmäkertoimen arvona, siis $\varepsilon_{Ekom} = 3,3$. Koska taulukon toimintalämpötilat ovat erilaiset kuin todelliset toimintalämpötilat, täytyy käytettävälle kylmäkertoimen arvolle tehdä vielä korjaukset toimintalämpötilan suhteen.

Toimintalämpötilojen korjaus tehdään yhtälön (3.2.5) mukaan. Lämpötilojen arvot ovat seuraavat:

$$T_{khö} = 7 - 6 + 273 = 274 \text{ K, kylmäaineen höyrystymislämpötila toimintapisteessä;}$$

$$T_{kla} = 40 + 273 = 313 \text{ K, kylmäaineen lauhtumislämpötila toimintapisteessä;}$$

$$T_{khöT} = 0 + 273 = 273 \text{ K, taulukkoarvoa vastaava kylmäaineen höyrystymislämpötila;}$$

$$T_{klaT} = 32 + 10 + 273 = 315 \text{ K, taulukkoarvoa vastaava kylmäaineen lauhtumislämpötila.}$$

Toimintalämpötilojen korjaus antaa nyt

$$\varepsilon_{Ekom} = 3,3 \frac{274}{313 - 274} \frac{315 - 273}{273} = 3,6$$

Osatehon vaikutusta kylmäkertoimeen ei tässä tarvitse erikseen ottaa huomioon sillä ilmoitettu ESEER arvo sisältää osatehon vaikutuksen (jos näin ei olisi, tulisi kylmäkerroin vielä kertoa taulukosta 3.2.5 saatavalla osatehokertoimella). Näin kompressorilaitoksen kylmäkertoimeksi tarkasteltavalle laskentatunnille tulee $\varepsilon_{Ekom} = 3,6$.

Ilmastoinnin kompressorijäähdytyksen häviöt ovat yhtälöiden (3.3.1) ja (3.3.3) mukaan

$$\Delta q_{hik} = (0,1+0,13+0,05) 20 \text{ kWh} = 5,6 \text{ kWh}$$

$$\Delta q_{hvk} = (0,0+0,13+0,1) 20 \text{ kWh} = 4,6 \text{ kWh.}$$

Laskentatunnin sähköenergian kulutukseksi ilmastoinnin kompressorijäähdytykselle tulee yhtälön (3.1.2) mukaan

$$e_{järkom} = \frac{q_{ji} + \Delta q_{hik} + \Delta q_{hvk}}{\varepsilon_{Ekom}} = \frac{20 + 5,6 + 4,6}{3,6} = 8,5 \text{ kWh}$$

Apulaitteiden sähkönkulutus muodostuu vapaajäähdytykselle pääosin jakelupiirin pumppausenergiasta sekä jäähdytystornille menevän piirin pumppausenergiasta. Jakelupiirin maksimipainehäviöksi on laskettu $\Delta p_{pu} = 116 \text{ kPa}$. Jäähdytysnesteen tilavuusviraksi saadaan edellä olevien tietojen mukaan $V = 5,9 \text{ l/s}$. Pumpun kokonaishyötysuhde ko. toimintapisteessä on $h_{pu} = 0,47$. Yhtälön (3.4.2) mukaan jakelupiirin pumppausenergiaksi tulee $1,45 \text{ kWh}$. Vastaavalla tavalla laskien tornille menevän piirin painehäviö on 42 kPa (ilman jäähdytystornia) ja tunnin pumppausenergiaksi tulee $0,52 \text{ kWh}$. Näin vapaajäähdytyksen apulaitteiden sähkönkulutus laskentatunnin aikana on $e_{puv} = 1,45 + 0,52 = 1,97 \text{ kWh}$.

Apulaitteiden sähkönkulutus ilmastoinnin kompressorijäähdytykselle muodostuu jäähdytysyksikön sekä ilmastointikoneen yhdistävän piirin pumppausenergiasta. Tässä tapauksessa piiri on lyhyt, koska molemmat laitteistot sijaitsevat samassa konehuoneessa. Piirin painehäviöksi on laskettu $\Delta p_{pu} = 65 \text{ kPa}$ ja tilavuusvirraksi $V = 1,5 \text{ l/s}$. Kun pumpun hyötysuhde on $h_{pu} = 0,39$, saadaan pumppausenergiaksi $e_{puk} = 0,25 \text{ kWh}$.

Koko vuoden sähköenergian kulutus saadaan laskemalla yhteen vuoden kaikkien tuntien sähköenergian kulutukset.