



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Lari Packalén

Kelluva lämmönvaihdin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

05.09.2020

Tekijä Otsikko	Lari Packalén Kelluva lämmönvaihdin
Sivumäärä Aika	22 sivua 05.09.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	Energiatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Tero Karttiala
<p>Insinööriyön tehtävänä oli suunnitella noin 1 MW -luokkaisen lämpöpumppujärjestelmän rakenteet, tekniset ratkaisut ja kelluva alusta. Insinööriyö on salassapitosopimuksen alainen, joten työssä ei julkaista kuvia tai tietoja tekniikan osalta. Nämä toimitetaan vain työn tilaajalle.</p> <p>Insinööriyö aloitettiin tutustumalla kelluvaan infrastruktuuriin ja erilaiseen vesirakentamiseen, sekä materiaalien ominaisuuksiin. Työssä käytettiin paljon 3D-ohjelmistoja, koska kuvien osuus ja suunnittelu huoltotyön toteuttamiseen on selkeästi insinööriyön isoin työvaihe.</p> <p>Vastaavia nostettavia vesilämmönvaihtimia ei ole samanlaisessa käytössä tai käyttökohteessa. Tämän takia samankaltaisista projekteista ei ollut käytettävissä lähtötietoja. Kaikki nostoon liittyvät tekniset ratkaisut ja niiden osat jouduttiin suunnittelemaan alusta loppuun saakka.</p> <p>Insinööriyössä onnistuttiin suunnittelemaan toimiva rakenne tekniselle tilalle ja vedenalaisiin osiin tarvittavat ratkaisut noston onnistumiseksi. Insinööriyön alkuperäinen tavoite saavutettiin.</p>	
Avainsanat	Lämmönvaihdin, lämpöpumppu, kelluva infra

Author Title	Lari Packalén Floating heat exchanger
Number of Pages Date	22 5 September 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and environmental engineering
Professional Major	Energy Engineering
Instructor	Tero Karttiala, Senior Lecturer
<p>The purpose of the engineering thesis was to design a heat pump system, structures, and technical solutions of about 1 MW class. The floating platform is manufactured and designed by Marinetek Oy, the steel structures, the technical space, and the wooden deck suitable for use were designed separately. The engineering thesis is subject to the NDA agreement; therefore, it does not present the images in terms of proportions or technology, but these are only delivered to Bluet Oy.</p> <p>The engineering thesis was started with an introduction to the floating infrastructure and various hydraulic engineering, as well as with the properties of the materials. Various pieces of 3D software were used in the thesis because the proportion of images and the design to perform out the maintenance work were the most important stage of thesis</p> <p>There were no corresponding liftable water heat exchangers in the corresponding use or application. As a result, no baseline data were available for similar projects and all technical solutions and parts related to the lifting had to be planned from start to finish.</p> <p>The engineering thesis succeeded in designing a functional structure for the technical space and the solutions needed for the underwater parts for successful lifting. The original goal of the engineering thesis was achieved.</p>	
Keywords	heat exchanger, heat pump, floating infrastructure

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämmön johtuminen	1
2.1	Konvektio	2
2.2	Säteily	2
2.3	Konduktio	3
3	Lämpöpumppu	4
3.1	Lämpöpumpun toimintaperiaate	4
3.2	Lämmönvaihdin	5
3.3	Lämmönvaihtimen materiaalit	6
3.4	Lämmönvaihtimen pumppu.	7
4	Lämmönvaihtimen likaisuuden vaikutus	8
4.1	Hiukkaslikaantuminen	10
4.2	Biologinen likaantuminen	10
4.3	Virtausnopeus ja jähmettyminen	10
4.4	Lämmönvaihtimen likaisuuden monitorointi	10
5	Ilmasäiliöt	11
6	Työnaikainen lämmönvaihtimen nosto	12
6.1	Nosteen laskeminen	13
6.2	Pääilmasäiliöiden noste	14
6.3	Päätyilmasäiliöiden noste	14
7	Lämmönvaihtimen teräsrakenteet.	15
7.1	Vesiolosuhteet	15
7.2	Teräksen valinta	16

8	Kelluva alusta	17
9	Tekninen tila	18
10	Säädökset ja rajoitukset	19
11	Vesilaki 27.5.2011/587	21
12	Johtopäätös	22
	Lähteet	23

1 Johdanto

Insinööriyön tilaajana toimii Bluet Oy ja mukana työntoteutuksessa on myös BIOS, joka on itsenäinen monitieteinen tutkimusyksikkö. Työn tarkoituksena on suunnitella kestävä tapa tuottaa kaukojäähdytystä ja kaukolämpöä lämpöpumppu- ja vaihdinkokoonpanolla. Lämpöpumppu mahdollistaa tehonnoston jäähdytys- ja kaukolämpöverkkojen suurissa kulutusasteissa sekä mahdollisuuksien mukaan uusien rakennusalueiden ainoana energiantuotantotapana.

Työn lämmönvaihdin ja lämpöpumppujärjestelmä suunniteltiin kellovalle alustalla. Lämpöpumppu hyödyntää vesistöihin sitoutunutta lämpöenergiaa. Vesistöjen lämpöenergian käyttö on vielä pientä. Suurimmaksi osaksi vesistöjä käytetään prosessien jäähdyttämisessä teollisuudessa ja lauhdevoimaloissa.

Insinööriyössä suunniteltiin prototyyppi toimivasta ja modulaarisesta ratkaisusta tuottaa lämpöenergiaa vesistöihin sitoutuneesta lämpöenergiasta hyödyntäen lämpöpumppuja. Edellä mainittuja ratkaisuja on olemassa, mutta pienemmässä kokoluokassa. Insinööriyössä keskitytään 1 MW:n kokoluokan toteutuksiin, joita tuotetaan modulaarisesti valmistettuina yksikköinä. Työssä käytetään valmiita komponentteja, mutta rakenteet ja tekniikka suunnitellaan kellovalle alustalle sopivaksi.

Työ tehdään salassapitosopimuksen mukaisesti. Kaikki julkaistavan raportin tiedot käytiin Bluet Oy:n kanssa läpi ja päätettiin julkaistavan insinööriyön sisältö. Kaikki tekniset kuvat ja liitteet on poistettu raportista. Raportti sisältää suunnittelun teoreettiset lähtökohdat ja osan suunnitteluratkaisuista.

2 Lämmön johtuminen

Lämpö johtuu aina molekyylien välittämänä aineessa. Termodynamiikan nollannen pääsäännön mukaisesti kaksi erillämpöistä kappaletta, jotka ovat kosketuksissa, pyrkivät

aina termodynaamiseen tasapainoon. Riippuen systeemistä ja kappaleiden kontaktipinoista jonkin ajan kuluttua kappaleet saavuttavat saman lämpötilan. Lämmön johtumisella on aina suuntana lämpimästä viileään.

Lämmön johtuminen on siis lämpöenergian siirtymistä. Lämpöenergia siirtyy vain kolmea eri tapaa noudattaen. Näitä ovat konvektio, konduktio ja säteily. (Cengel 2017, 30.)

2.1 Konvektio

Konvektiossa lämpöenergia siirtyy aineiden virtauksien mukana. Konvektio voi olla ”vapaa” tai ”pakotettu”. ”Vapaa konvektio” tapahtuu luonnollisesti, esimerkiksi patterista nouseva lämmin ilma nousee ylöspäin ja tämä ilmavirta siirtää lämpöenergiaa eteenpäin.

”Pakotetussa konvektiossa” ilmaa tai nestettä siirretään mekaanisesti, esimerkiksi puhallin puhaltaa patteria kohti ja nopeuttaa näin lämmönsiirtymistä ilmassa. Konvektiota voidaan tutkia kaavalla 1. (Cengel 2015, 67.)

$$q = h A \Delta T \quad (1)$$

jossa

- q = siirtynyt lämpömäärä
- h = lämmönsiirtymiskerroin ($W/m^2 K$)
- A = pinta-ala
- ΔT = lämpötilaero.

2.2 Säteily

Säteilyssä lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisenaaltojen välityksellä. Tämä muoto ei tarvitse väliaineita toisin kuin muut kaksi tapaa. Kaikki kappaleet, jotka ovat absoluuttisen nollapisteen (0 K) yläpuolella, säteilevät lämpöä. Lämpötilan noustessa tarpeeksi paljon

alkaa säteily olla silmillä nähtävää ja säteilyn energiamäärä kasvaa huomattavasti. Säteilyn osuessa väliaineeseen lämpösäteily pyrkii heijastumaan aineen pinnalta. Osa lämmöstä kuitenkin aina absorboituu väliaineeseen ja osa heijastuu pois aineesta. (Cengel 2015, 717.)

Hyvä esimerkki säteilystä on aurinko ja sen tuottama lämpöenergia. Kaikki auringon tuottama lämpöenergia siirtyy säteilemällä maahan. Maassa auringon lämpöenergiasta osa absorboituu, vain absorboitunut lämpöenergia siirtää energiaa väliaineeseen. Säteily pyrkii aina heijastumaan takaisin avaruuteen. Tämän takia musta metallilevy on kesällä auringonvalossa kuumempi kuin vastaava levy varjossa. (Cengel 2015, 66.)

2.3 Konduktio

Kappaleiden välillä on olemassa lämmön johtumista eli konduktiota, jolla tarkoitetaan lämpötilaeron tasapainoon pyrkimistä. Konduktiota tapahtuu nesteissä, kaasuissa ja kiinteissä olomuodoissa. Johtuminen tapahtuu elektronien liikkumisen ja atomien värähtelyn avulla. Näistä tehokkaampi on elektronien liikkuminen. Konduktiota kuvataan Fourierin lämmönjohtavuuskaavalla 2, joka kuvaa poikkipinta-alan lämpövirtaa. (Cengel 2015, 67.)

$$\phi = -\lambda A \Delta T \Delta x$$

$$-\lambda = \text{materiaalin lämmönjohtavuus}, \frac{W}{m \cdot k} \Delta T \quad (2)$$

= *gradientti, lämpötilan lasku pituus yksikköä kohti*

A = poikkipinta - ala

Miinusmerkkinen materiaalin lämmönjohtavuus johtuu lämpöenergian suunnasta kuumasta kylmään. Kun lämpöenergia siirtyy materiaalikerroksen läpi, sovelletaan yhtälöä.

$$\phi = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$-\lambda = \text{materiaalin lämmönjohtavuus}, \frac{W}{m \cdot k}$$

- A = poikkipinta-ala
- L = materiaalikerroksen paksuus
- $T_2 - T_1$ = lämpötilaero.

Materiaalin lämpöisolanssi johdetaan kaavasta 2, yksikkö $M = \text{Km}^2/\text{W}$ kuvaa lämmönsiirtymiskertoimen käänteislukua.

$$\Phi = \frac{A(T_1 - T_2)}{M}, \quad M = \frac{L}{\lambda}$$

3 Lämpöpumppu

Lämpöpumppuja on useita erilaisia, kaikissa on käytännössä sama toimintaperiaate. Pumppujen eroina on usein lämpöenergian lähde ja kylmäaineet. Erilaisia lämpöpumppuja on ilmailmalämpöpumppu, ilma-vesilämpöpumppu, maalämpöpumppu, poistoilmalämpöpumppu ja vesilämpöpumppu. (Lämpöpumppujen hankintaopas kunnat ja taloyhtiöt 2018.)

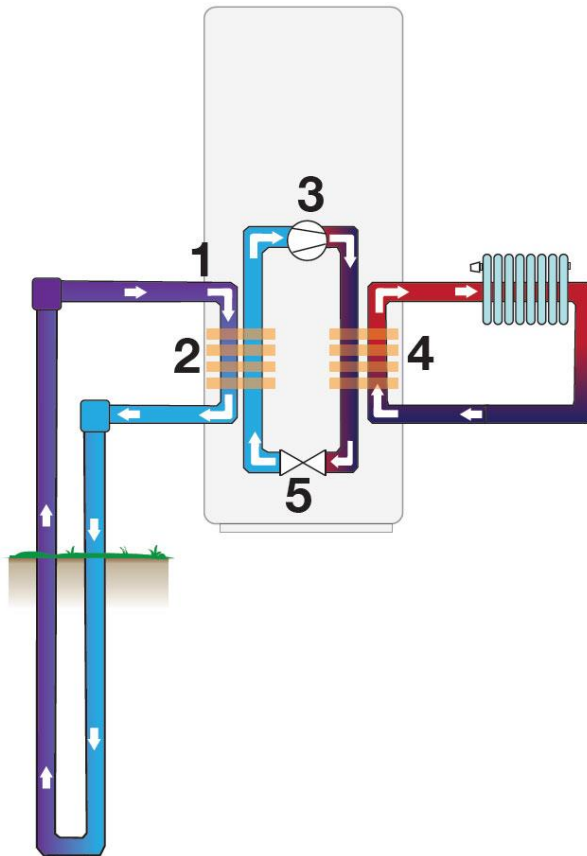
3.1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Seuraavalla sivulla oleva kuva (kuva 1.) esittää maalämpöpumppua, joka lämmittää vesikiertoista lämmitysjärjestelmää. Tässä tapauksessa kylmäaineita on maakerroksessa ja itse pumpussa. Maakierron ja pumpun tekemä lämpöenergia siirretään vesikiertoon lämmönsiirtimien avulla.

Lämpöpumppujen tärkeimmät komponentit ovat lämmönsiirtimet, joita on kaksi, paisuntaventtiili ja kompressori. Kuvassa (kuva 1.) lämmönsiirtimet ovat pisteissä 2 ja 4. Paisuntaventtiili on pisteessä 5 ja kompressori on pisteessä 3.

Paisuntaventtiilin (piste 5) jälkeen lämpöpumpun kylmäkierron oleva neste pystyy vastaanottamaan lämpöenergiaa maalämpökierron. Tämän jälkeen maakerrosta saatu lämpöenergia sisältävä neste siirtyy kompressoriin (piste 3). Kompressori tekee mekaanista työtä nesteeseen ja nostaa lämpötilaa, sekä painetta nesteessä. Kompressorin ja maakierron tekemä lämpöenergia siirtyy kylmempään vesikiertoon lämmönsiirtimen

(piste 4) avulla. Tämän jälkeen paisuntaventtiili (piste 5) mahdollistaa paineen laskemisen ja kylmäaineen palautumisen kylläiseksi nesteeksi. Lämpöpumpun työ perustuu siis faasimuutokseen nesteessä ja sen lauhduttamisessa. (Lämpöä ilmassa 2012.)



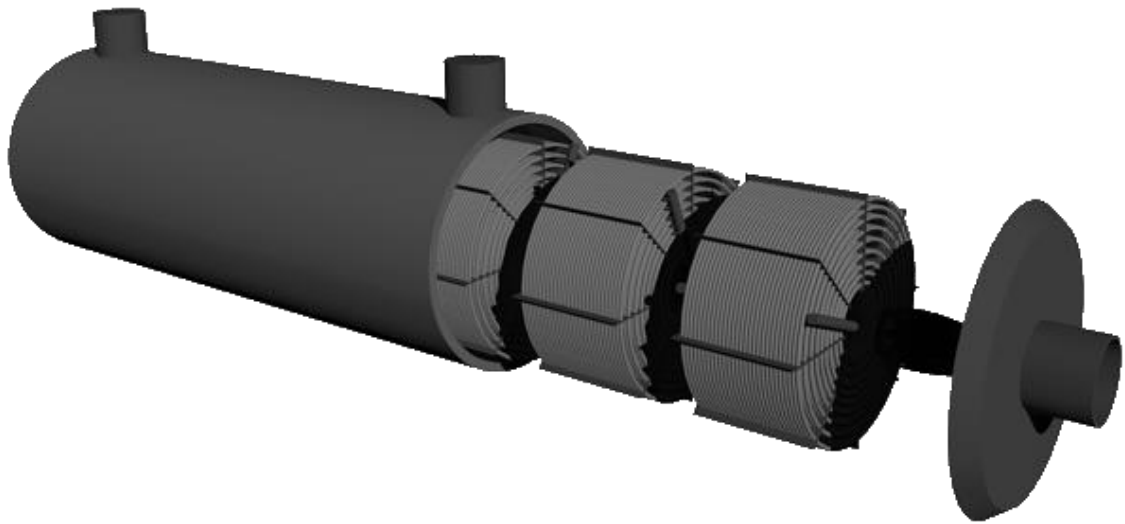
Kuva 1. Maalämpöpumpun toimintaperiaate (Pekkala 2012, 114.)

3.2 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihtimen tehtävä on siirtää lämpöenergiaa eri lämpötiloissa olevien kaasujen ja nesteiden välillä. Eli lämmönsiirtimissä pyritään tuomaan kaksi erilämpöistä olomuotoa lähemmäksi toisiaan, että lämmön on mahdollisimman tehokasta siirtyä vaihtimen rajapinnoilta. Tämä perustuu termodynamiikan toiseen pääsääntöön, termodynaamiseen tasapainoon. Lämmönsiirtimet ovat yleensä laitteita, joissa ei ole liikkuvia osia, vaan ne perustuvat edellä mainittuun perusfysikaaliseen ilmiöön. (Geopipe Oy. 2016.)

Insinööriyössä käytettävä lämmönvaihdin on Geopipe Oy:n tuottama WHCEP Mega. Se on kokonaisuutena skaalattava ja modulaarinen valmistuote. Vaihdin on kokonaisuudessa polyeteeniä (PE100). Sen teho määräytyy veden ja nestekierron lämpötilaerosta, sekä nesteiden vaikutusajasta toisiinsa. Vaihtimen tehoa voidaan säädellä moduulien avulla, yksi moduuli on 90–120 kW riippuen vaihtimen sijoituspaikasta ja syvyydestä. WHCEP Megassa on mahdollisuus asentaa 2–6 kappaletta moduuleja (kuva 2.), näin WHCEP Megan teoreettinen teho on 720 kW. (WHECP Mega. 2016.)

Lämmönvaihtimessa vedenkierrosta vastaa pumppu, jonka tehtävä on tuottaa tarvittava massavirta vedelle. Vesimassan arvioitu määrä on alussa noin 60 l/s. Vaihdin on tarkoitettu nostaa vedenpinnan yläpuolelle tarvittaviin huoltotöihin, vaihdin nostetaan käyttämällä ilmaa. Vaihtimen pohjassa on 5 kpl 70 mm:n reikiä, joista vesi valuu nostettaessa.



Kuva 2. Geopipe Oy:n valmistama lämmönvaihdin WHCEP Mega (WHCPE Mega 2016)

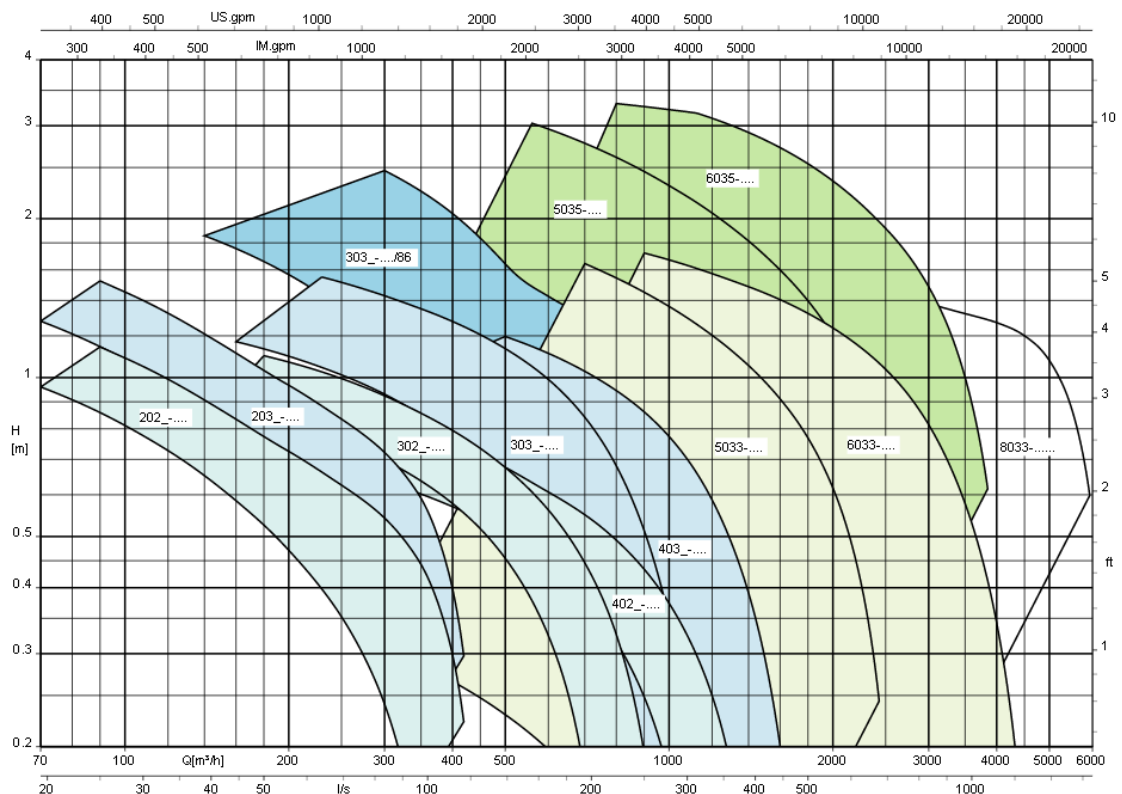
3.3 Lämmönvaihtimen materiaalit

WHECP Mega lämmönvaihdin on valmistettu kokonaan polyeteenistä (PE100). Polyeteeni hyvin korroosion kestävä ja helposti muokattavaa materiaalia. PE100:n lämmönsiirtokerroin on 0,38W/mK, joka on huomattavasti huonompi verrattaessa metalleihin (kupari 390 W/mK). Tästä syystä insinööriyön lämmönvaihtimen rungossa on noin yhdeksän kilometriä PE100-putkea. PE100-putki on materiaalina hyvä keveyden ja korroosion kestävyys takia, mutta lämmönjohtamisen kannalta huono.

Polyeteenin ominaisuudet korroosion kestossa ovat kuitenkin tärkeitä johtuen lämmönvaihtimen sijoituksesta meriveteen. Merivesi toimii myös lämmönvaihtimen työnesteenä. Tämä asettaa lämmönvaihtimen rungon ja kierukan materiaalin korroosion kannalta vaativaan paikkaan. Polyeteeni on myös merivedessä kelluva. Sen noste helpottaa nostotyötä ja runkoon kohdistuvia rasitteita.

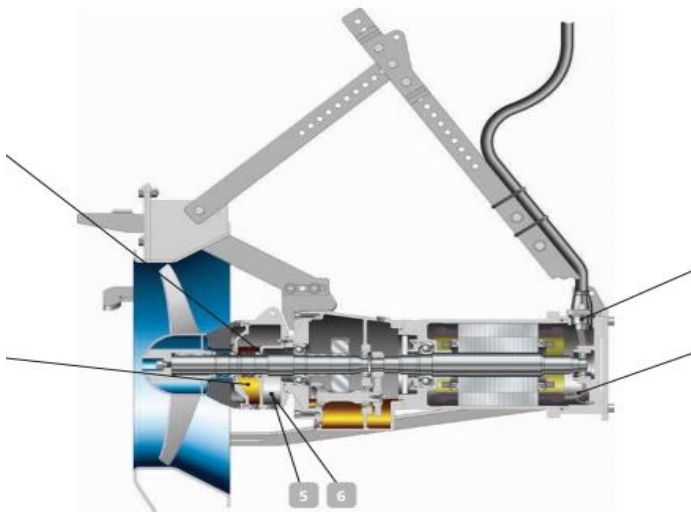
3.4 Lämmönvaihtimen pumppu.

Lämmönvaihtimen keruupiirissä kiertää työnestettä. Tässä tapauksessa se on merivettä, jota pitää pystyä siirtämään lämmönvaihtimen läpi noin 35–50 kg/s. Pumpun tulee olla asennettuna vaihdinrungon poistoimuyhteen sisälle. Tämä mahdollistaa helpon huoltamisen ja vaihdinrungon sisälle jää tilaa työskennellä. Alla olevasta kuvasta (Kuva 3.) näkee Amaline-pumppujen eri mallien eron ominaisuuskäyrää tutkimalla. (Potkuripumppu Amacan P, 2021; Uppopumppu Amaline, 2021)



Kuva 3. Amaline-pumppumallien ominaisuuskäyrät (KSB 2021.)

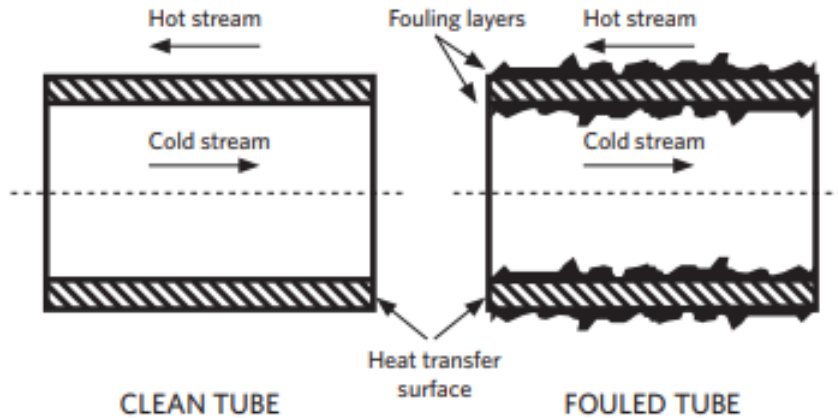
Insinööriyön pumppuratkaisuun jäi kaksi mahdollista pumppumallia: KSB Oy:n valmistamat Amaline, joka on vedenalle vaakaan asennettava uppomoottori potkuripumppu, ja Amaca P-putkikulupumppu, joka voidaan asentaa pysty- ja vaaka-asentoon. Pumpuissa on kaksiosainen kumitiiviste ja mekaaninen huulitiiviste. Tästä syystä ominaisuudet tekevät pumpuista luotettavan uppopumppuratkaisun. Molemmissa pumpuissa on ruostumattomasta teräksestä valmistettu propelli, joka pystyy murskaamaan pumppuun päätyvät pienpartikkelit. Alla olevassa kuvassa (kuva 4.) näkyy Amaline-pumpun rakenne. (KSB 2021.)



Kuva 4. Amaline-pumpun rakenne (KSB 2021.)

4 Lämmönvaihtimen likaisuuden vaikutus

Likaisuus lämmönvaihtimissa tarkoittaa vaihtimen lämpöpinnoille muodostuvaa orgaanista kerrostumaa. Tämä johtuu nesteissä olevista epäpuhtauksista tai kemiallisista ominaisuuksista. Likaisuus vaikuttaa lämmönvaihtimen kykyyn johtaa lämpöä ja näin vaikuttaa negatiivisesti vaihtimen tehokkuuteen. Myös virtausvastus kasvaa lämmönvaihtimen pintojen likaantuessa ja tämä nostaa paine-eroja, mikä puolestaan aiheuttaa pumppujen tehonnostotarpeen. Alla olevassa kuvassa (kuva 5.) esitellään likaantumisen vaikutuspinnat.



Kuva 5. Putkilämmönvaihtimen siirtopinnat ilman ja likakerroksen kanssa (Energiatehokas lämmönsiirto, 2016.)

Likaantumusrakenteita on useita erilaisia ja nämä on koottu yhteen alla olevassa kuvassa (kuva 6.). Luvuissa 4.1–4.3 esitellään lopputyön osalta tärkeimmät likaantumusrakenteet. (Energiatehokas lämmönsiirto, 2016.)

Muuttuja	Saostuminen	Jähmettyminen	Hiukkaslikaantuminen	Kemiallinen likaantuminen	Korroosio	Biologinen likaantuminen
Lämpötila	↑↓	↓	↑↓↔	↑↓	↑↓	↑↓↔
Virtausnopeus	↓↔	↑↓	↓	↓	↑↓↔	↑↓
Liuoksen ylikylläisyys	↑	↑				
pH	↑		↑↓		↑↓	↑↓
Epäpuhtaudet		↓				
Ylim. aineen konsentraatio	↑	↑	↑			
Pinnan karheus	↑	↑	↑↔		↑↔	↑
Paine	↔	↔		↑	↑	↑↓
Happipitoisuus	↔	↔		↑	↑	↑↓

↑ = edistää likaantumista
 ↓ = hidastaa likaantumista
 ↔ = vähäinen vaikutus
 = asiaa ei ole tutkittu riittävästi/tulokset epä johdonmukaisia

Kuva 6. Suureiden vaikutus vaihtimen likaisuudessa (Energiatehokas lämmönsiirto, 2016)

4.1 Hiukkaslikaantuminen

Hiukkaslikaantuminen on likaantumista, jossa virtaavien aineiden sisältämät epäpuhtaudet alkavat kerääntymään lämpöpintojen pinnalle. Tämä voi johtaa myös eroosioon, mikäli nesteessä on kiintoaineita, kuten sedimentti tai mineraalihiukkasia. Yleisesti kiintoaineet nesteessä voidaan estää suunnittelulla ja suodattamalla nesteet. (Energiatehokas lämmönsiirto, 2016.)

4.2 Biologinen likaantuminen

Biologinen likaantuminen tarkoittaa erilaisten biologisten organismien kiinnittymistä ja kasvua lämmönsiirtopinnoilla. Näitä ovat esimerkiksi levät, hiivat, sienet, homeet sekä bakteerit ja makroeliöihin simpukat, siimajalkaiset ja kasvillisuus. Käytännössä biologinen likaantuminen näkyy lämmönsiirtopinnassa biofilminä, joka toimii eristävänä ja pinnankarheutta nostavana kerrostumana. Tyypillisimmät biologisen likaantumisen esiintymispaikat ovat lämmönvaihtimet, joissa jäähdytykseen käytetään luonnonvesiä. (Energiatehokas lämmönsiirto, 2016.)

4.3 Virtausnopeus ja jähmettyminen

Jähmettyminen tarkoittaa virtaavan aineen lämpötilan laskua lämpöpinnalla niin, että virtaava aine jähmettyy lämpöpintaan. Lämmönvaihtimen keruupuolen lämpöpinnoille jähmettynyt neste on iso tehokkuuden pudottaja. Virtausnopeus korreloi yleensä lämpöpintojen likaisuuden kanssa. Nopeampi virtaus ehkäisee lian ja kasvuston tarttumista pinnoille. Toki liian nopeavirtaus edesauttaa eroosiota ja nostaa laitteiston käyttökustannuksia. (Energiatehokas lämmönsiirto, 2016.)

4.4 Lämmönvaihtimen likaisuuden monitorointi

Lämmönsiirron tarkkailu virtauksien ollessa vakioita nähdään likaantuminen lämmönsiirtokyvyn heikkenemisenä. Tämä johtuu siirtopinnojen päälle kertyneestä liasta, joka toimii

eristeenä nesteiden välillä. Hyvällä monitoroinnilla vaihtimen huollon tarve voidaan ennakoida ja tehdä käytön aikaisia toimia, kuten nostaa virtauksia kompensoimaan lämmönsiirto pintojen likaisuutta.

Seurannassa tulee valvoa ainakin seuraavia muuttujia:

- prosessin kohdelämpötila
- lämmönsiirto
- Painehäviö

(Energiatehokas lämmönsiirto, 2016)

5 Ilmasäiliöt

Ilmasäiliöt ovat PE100-muovista valmistettuja ja paikan päällä yhteen hitsattuja DN1200-putkia. Tämä ratkaisu kehitettiin insinööriyössä. Ilmasäiliöitä on 3 kappaletta jokaista vaihdinkokonaisuutta kohtaan. Nostotyön vaadittava ilma tuotetaan esimerkiksi vuokratavissa olevalla teollisuuskompressorilla. Kompressorin minivaatimukset ovat 10 baarin työpaine ja 2,5–20 m³:n tuotto. Kompressorin voi olla diesel- tai sähkökäyttöinen, koska nostoalustalla on saatavissa korkeajännitesähkö.

Ilmasäiliöissä on jokaisessa neljä kappaletta 75 mm tyhjennysreikiä pohjassa. Niistä vesi johdetaan ulos, kun nostotyössä tarvittava ilma pumpataan säiliöiden yläpuolelta 1 atm paineella.

Jokaiseen ilmasäiliöön tulee oma 75 mm paineilmaputkisto, jonka paineilmayhde tulee puisen kansirakenteen alle. Näin voidaan minimoida nostossa tarvittavan putkiston pituus ja putkistoon kohdistuvat rasitteet. Paineilma jaotellaan jokaiseen ilmasäiliöön jakotukin kautta, jokaisessa säiliössä on kolme yhdettä.

Paineilmaputkisto rakennetaan teräsrakenteeseen kiinteästi. Paineilmaputkisto koostuu 7,8 m pitkistä 75 millimetrin vaakaosuudesta. Siitä lähtee kolme 75 mm lähtöä 2,5 metrin välein "L-muodossa", jossa on paineilmayhteet jokaiseen ilmasäiliöön. Putkisto tehdään PN16-paineluokassa, vaikka ilmasäiliön paine pidetään 1 atm:n paineessa.

Päätyilmasäiliöiden osalta käytetään vastaavaa 75 mm:n putkistoa. Päätysäiliöihin tulee kaksi ilmayhdettä, koska säiliöt ovat kaksiosaiset.

Jokaisessa ilmasäiliöön menevässä paineilmaputkessa tulee olla omalla palloventtiilillä varustettu sulku, ja 75 mm:n kompressorin yhteessä tulee olla myös ilmatiivis palloventtiiliventtiili. Venttiilit tulee sulkea nostotyön jälkeen työturvallisuuden takia.

Paineilmajärjestelmiin erikoistuneen yrityksen tulee suunnitella ja asentaa paineilmaputkisto ja -instrumentit. Ilman tasainen jakaminen säiliöihin on ehdottoman tärkeää, jotta nostotyö voidaan toteuttaa turvallisesti ja rikkomatta ympäröiviä rakenteita.

6 Työnaikainen lämmönvaihtimen nosto

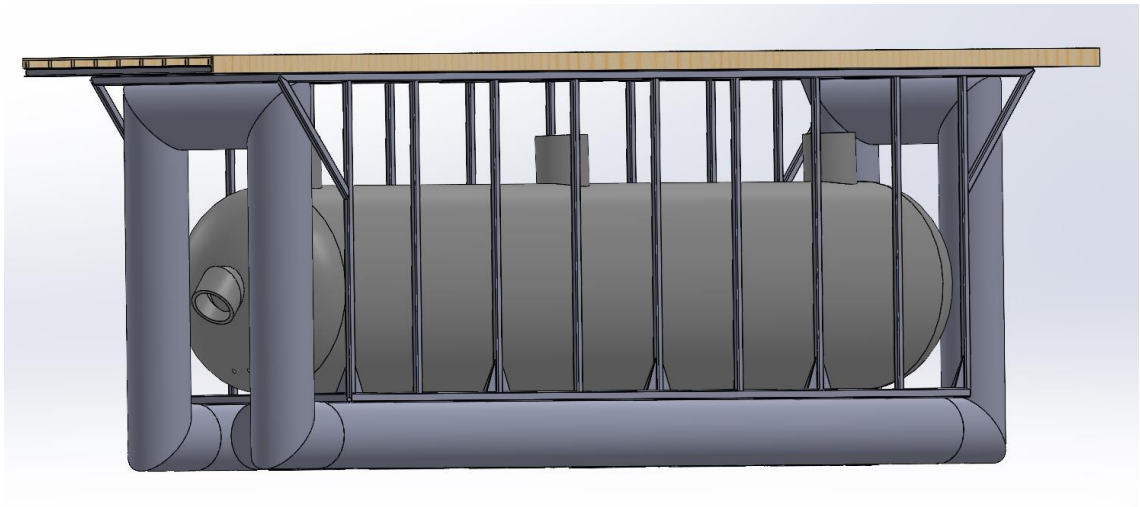
Lämmönvaihdin ja vaihtimen teräsrakenteet nostetaan kahdessa vaiheessa ylös vuosi-
huoltojen ajaksi. Ensimmäisessä vaiheessa nostetaan päätysäiliöillä rakenne vedenpin-
nan tasoon. Päätyilmasäiliöt ovat 4,7 m³ tilavuudeltaan ja yhteensä noin 9,4 m³. Ilmasäi-
liöt ovat näkyvissä alempana olevassa kuvassa (kuva 7.).

Toisen vaiheen nostotyö toteutetaan rakenteen alla olevilla ilmasäiliöillä, ilmasäiliöt ovat
jokainen 15,6 m³ tilavuudeltaan ja ilmasäiliöitä on kolme kappaletta. Nostotyöhön tarvit-
tava noste lasketaan luvussa 6.1. Ilmasäiliöiden pituutta voidaan muokata tarvittavan
nosteen saavuttamiseen aina 9–15 metrin välillä. Ilmasäiliöt täytetään 1 atm paineeseen,
ilmasäiliöt ovat ”hengittävät”, eli ne poistavat säiliöpohjasta meriveden ja ylimääräisen
ilman. Kun ilmasäiliöiden pohjista nousee ilmaa 2,5 m välein, tiedetään kaikkien säiliöi-
den olevan täynnä.

Nostotyö toteutetaan kaksivaiheisena, ensimmäisessä vaiheessa vaihdin nostetaan ve-
denpinnan tasolle. Vaihtimen nostaminen pinnan yläpuolelle stabiloi nostoa huomatta-
vasti, koska vaihdin altistuu ilmanpaineelle rikottuaan vedenpinnan. Tämä vähentää nos-
tettavan kappaleen nostovoiman mahdollista suuntaa, koska hydrostaattinen paine on
vain suoraan kappaleen alapuolella, jolloin nostovoima kohdistuu suoraan vastakkai-
seen suuntaan eli ylös. Toisen vaiheen tarkoitus on nostaa vaihdin ja teräsrakenne ko-
konaisuudessa pois vedestä. Tukipisteitä on mahdollista lisätä teräsrungosta vaijerien
avulla estämään sivuttaisliikettä.

Yhteensä ilmasäiliöiden tilavuus on siis $46,8\text{m}^3$. Nostettavan rungon paino koostuu seuraavasti:

- vaihdin 12 t
- nestekierto 13 t
- puukansi 1,8 t
- teräsrunko 6,5 t
- PE-100 putkisto 1,1 t
- pumppu ja tarvittavat yhteen 0,3 t
- näiden yhteenlaskettu massa varmuuskertoimella 0,1 on n. 38,2 t.



Kuva 7. Lämmönvaihtimen teräsrunko ja ilmasäiliöt.

6.1 Nosteen laskeminen

Insinööriyössä suunnitellun nostettavan kokonaisuuden laskennassa käytettävä massa on 36,6 t, tässä massassa on itsessään 0,1:n varmuuskerroin. Päätysäiliöiden noste lasketaan alempana.

PE-100 muovi on itsessään kevyempää kuin merivesi, joten ilmasäiliöiden omapainoa ei huomioida laskennassa, koska voidaan olettaa niiden olevan vähintään neutraalissa nosteessa. Arkhimedeen periaatteen mukaan noste on sama kuin syrjäytetyn aineen massa. Työssä tämä tarkoittaa meriveden massaa, joka syrjäytetään ilmalla. Nosteen kaava (3) on esitelty kohdissa 6.2 ja 6.3.

6.2 Pääilmasäiliöiden noste

Säiliön noste saadaan laskettua kaavalla:

$$F = \rho V g \quad (3)$$

- F = nostevoima
- ρ = nesteen tai kaasun tiheys
- V = syrjäytetyn neste-, kaasutilavuus
- g = painovoima.

Sijoitetaan kaavaan tiedot.

$$F = 1007 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 46,8 \text{ m}^3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 462322 \text{ N} \quad (3)$$

- $\rho = 1007 \text{ kg/m}^3$
- $V = 46,8 \text{ m}^3$
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Laskennasta saadaan n. 462 kN, joka vastaa noin 47 tuhatta kiloa nostevoimaa. Rakenteiden laskennallinen paino oli 38,4 t. Tämä vastaa n. 18 %:n ylimääräistä nostokykyä, jolloin voidaan katsoa rakenteissa olevien 14,2 metriä pitkien ilmasäiliöiden riittävän rakennelman turvalliseen nostoon toisessa vaiheessa.

6.3 Päätyilmasäiliöiden noste

Päätyilmasäiliöiden noste lasketaan seuraavasti:

$$F = 1007 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,4 \text{ m}^3 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 92859,5$$

- $\rho = 1007 \text{ kg/m}^3$
- $V = 9,4 \text{ m}^3$

- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Laskennan tulokseksi saadaan n. 92kN, joka vastaa noin 9,3 t nostevoimaa. Nostettavien rakenteiden paino on alle 9 t. Vaihdin ja nestekierto on vähintään neutraalissa nosteessa vedenalla. Tästä voidaan päätellä päätyilmasäiliöiden olevan riittävän tilavat ensimmäisen vaiheen nostoon.

7 Lämmönvaihtimen teräsrakenteet.

7.1 Vesiolosuhteet

Teräsrakenteeseen vaikuttaa paljon, mihin ja minkälaiseen vesistöön se sijoitetaan. Teräsrakenteita suunniteltaessa tuleekin ottaa huomioon mahdolliset korroosiokohdat ja -paikat. Korroosion voimakkuuteen vaikuttaa kaikki ympäristötekijät, kuten ilmansaasteet ja käyttöolosuhteet. Ympäristötekijöihin lasketaan kloridipitoisuus, mikrobiologinen, ionit ja kuinka hapettavaa alueen ympäristö on. Virtausolosuhteet vaikuttavat materiaaleihin tuomalla hyötyjä ja haittoja, kuten hidastamalla kasvillisuuden pääsyä rakenteisiin. Toisaalta negatiivisesti se vaikuttaa kaikkiin rakenteisiin tehden niistä huomattavasti hankalampia ylläpitää ja suunnitella. Myös ioneissa merkittävä tekijä on esimerkiksi inhiboivat ionit, esimerkiksi sulfaatit. Myös käytöllä on oma vaikutuksensa korroosion edistämiseen, kuten nostosykli ja veden lämpötila.

Vesistö rakentamisessa käytetään pääsääntöisesti ruostumattomia teräksiä tai alumiineja, johtuen hyvästä korroosiokestävyydestä. Kuitenkin kloridi-ionit ovat näillekin merkittävä korroosion aiheuttaja ja niiden määrä vesistössä määrittelee paljon huoltoväliä. Vesi ja varsinkin merivesi toimii todella tehokkaana katalyyttinä. Valtamerien suolapitoisuus on noin 3,5 %, koska Itämeri on murtovesiallas, niin sen suolapitoisuus on alle 1 %:n. Suolat kerrostuvat merivedessä. Suolapitoisuus kasvaa, mitä syvemmältä näytteitä otetaan. Suurin riski korroosiolle on usein aivan vedenpinnalla ”roiskevesivyöhykkeessä”, tämä johtuu suolan konsentroitumisesta veden haihtuessa. (Leino ym.1998).

7.2 Teräksen valinta

Teräksen valinta vesirakentamisessa ei ole yksioikoista, vaan monen asian summa. Ruostumattomalla teräkselle tyypillisiä korroosion muotoja on piste- ja rakokorroosio. Pistekorrosio vaikuttaa suurilta osin vain teräspintojen ulkonäköön, mutta voi myös pahissa tapauksissa aiheuttaa paikallisen rakenteen heikkenemisen ja tämä voi vaikuttaa koko rakenteeseen heikentävästi. Projektissa ei teräspintojen ulkonäöllä ole vaikutusta johtuen upotuksesta. Kuitenkin hitsauksien ja työstötapojen tulee olla laadukkaita, jotta rako- ja pistekorroosion vaikutus saadaan minimoitua. Alla olevassa kuvassa (kuva 8.) esitellään eri ruostumattoman teräksen soveltuvuutta vesistö rakentamiseen.

	Itämeren vesi (murtovesi)	Makea vesi	Fouling (kiinnittävät eliöt, meri- ja makeavesi)	Maantie-suola	Koirien urea
1.4301 (304) 1.4307 (304L) 1.4318 (301LN)	—	++ Cl < 200 (rk ja pk)	+ rk	+ (pk ja rk), jk	++ (pk)
1.4162 (LDX 2101)	[+] (pk ja rk)	[++] (pk ja rk)	[+] rk	[+] (pk ja rk) rk	[++] (pk)
1.4404 (316L) 1.4401 (316)	+ (pk ja rk)	++ Cl < 500 (pk ja rk)	+ rk	++ (pk ja rk)	++ (pk)
1.4462 (Duplex 2205)	++ (pk ja rk)	++	+ (rk)	[++]	++
<p>— = ei soveltu käytettäväksi suojaamattomana + tai ++ = soveltuu käytettäväksi (pk ja rk) = piste- ja rakokorroosiovaara otettava huomioon erityisesti tiiviyyttä vaativissa rakenteissa tai jos on vaara, että syöpyminen keskittyy rakenteen kantavuuden kannalta epäedullisesti rk = rakokorroosiovaara otettava huomioon rakenteita suunniteltaessa (rk) = kuten rk, mutta vaara pienempi jk = jännityskorroosioriski, jos vetojännityksiä ja CaCl₂ läsnä [] = ei käyttökokemuksia Cl = kloridipitoisuus (mg/l)</p>					

Kuva 8. Ruostumattomien terästen korrosio ja soveltuvuus vesistö rakentamisessa. (vttresearch 1998, 90)

Edellisestä kuvasta (kuva 8.) huomataan, että Suomen merivesiolosuhteissa suositellaan käyttämään haponkestävää terästä. Eli teräksen tulee täyttää standardin EN 1.462 vaatimukset. Outokumpu Oy valmistaa tuotetta LDX 2102®. Kyseisen teräksen ominaisuuksia ovat.

- tiheys 7,8 g/cm³
- elastisuus kerroin 200 GPa @20°C
- Poissonin suhde 0,3
- lineaarinen laajentuminen 13.0*10⁻³/°C @20.

Yllä olevasta luettelusta puuttuu termodynaamiset ominaisuudet, koska ne eivät ole työn kannalta tärkeitä.

8 Kelluva alusta

Kelluva alusta koostuu Marinetek Oy:n valmiista komponenteista, joita joudutaan muokkaamaan tarkoitukseen sopivaksi. Alustan rakenne pyritään toteuttamaan monikäyttöön, eli alusta voi toimia vapaa-ajan toiminnoissa. Koko rakennelma voidaan näin sulauttaa ympäristöön, esimerkiksi kelluvana jalkakäytävänä, koska tekninen tila on mahdollista toteuttaa huomaamattomana ja erillisenä.

Bluet Oy:llä on pitkä kokemus kansainvälisesti kelluvien alustojen rakentamisessa ja vedenpäällisen infran vesirakentamisesta. Marinetek Oy ja Bluet Oy ovat tehneet useita yhteiskohteita. Näistä referenssejä ovat muun muassa:

- Allas Sea Pool, Helsinki
- Harstadin kelluva uimala, Norja
- Panko, Nordic Vibes in One
- Vök Baths, Islanti



Kuva 9. Marinetek Oy:n kelluva alusta Helsinki Allas Sea Poolissa.

Kelluva rakenne koostuu betoniponttooneista, jotka kiinnitetään toisiinsa käyttökohteen mukaan teräsrakenteilla. Teräsrakenteiden päälle tulee puukansirakenteet kohteen käyttötarkoituksen mukaan.

Betoniponttonit on suunniteltu eurooppalaisen EN 206-1-standardin mukaisesti, joka määrittää rasiusluokituksen. Ponttonissa käytetty betoni on 44–55 N/mm² muovikuitu-betonia. Raudoitukset ovat kuumasinkittyä terästä ja betoniponttonin sisällä on EPS-muovi 15 kg/m³. Koko projekti toteutetaan viidellä ponttonielementillä, joihin tulee edellistä kuvaa (kuva 9.) vastaava rakenne kansiin (Marinetek Oy 2019).

9 Tekninen tila

Tekninen tila sijoitetaan omalle kelluvalle alustalle. Tämä mahdollistaa teknisen tilan toimivuuden paremmin isoissa kokonaisuuksissa, joissa on useampi lämmönvaihdin. Teknisen tilan ja lämmönvaihdin alustojen tulee olla elastisesti yhdistetty, jotta mahdolliset aallot rasittaisivat mahdollisimman vähän vedenalaisia rakenteita, joita ovat lämmönvaihdin, vaihtimen kannakkeet ja lämmönvaihtimen putkisto.

Putkisto itsessään on joustavaa ja hyvin korroosiota kestävä PE100- muoviputkea. Putkeen jätetään tarpeeksi liikkumistilaa, sekä liitetään mahdollisesti joustavampi haitari-putki osuus. Näin vedenalaiset putkiosuudet voisivat olla huomattavasti lyhyemmät.

Teknisessä tilassa on lämpöpumppujen ja pumpun ohjauksessa käytettävä tekniikka. Tila rakennetaan 14 metrisen merikontin runkoon ja verhoillaan puukanteen sopivaksi. Merikontti toimii tarkoitukseen hyvin. Tämä mahdollistaa teknisen tilan valmiiksi rakentamisen maissa ja helpottaa huoltotyötä.

Teknisen tilan laitteisto on tarjouskilpailussa, joten insinööriyö käsittelee vain laitteiston yleisesti, eikä syvenny malleihin tai valmistajaan. Teknisentilan suunnittelu ja toteutus lopulliseen laiteasemointiin tapahtuu laitteiston toimittajan suunnitelman mukaisesti.

Tarvittava laitteisto:

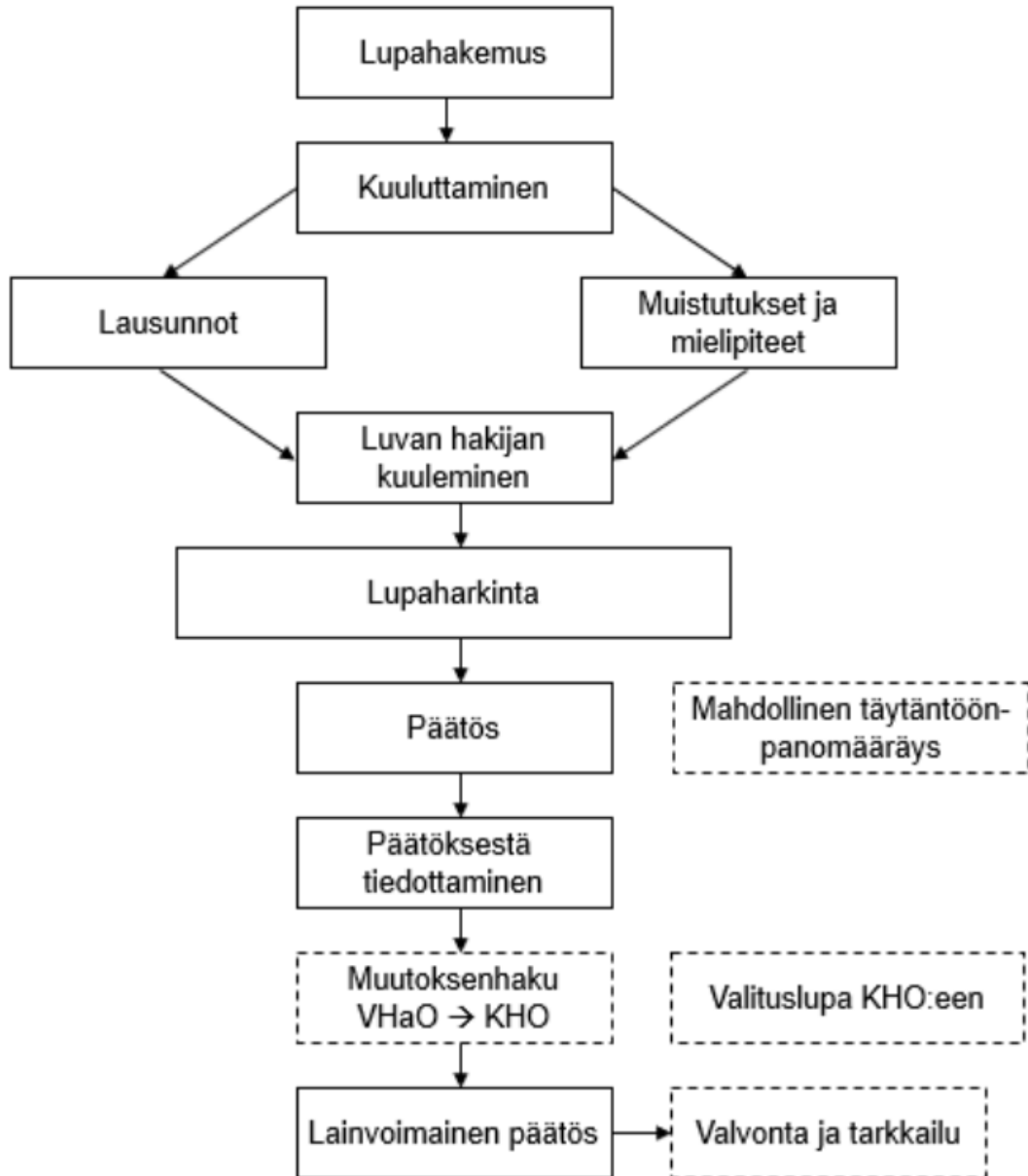
- lämpöpumput, yhteenlaskettu teho 547kW
- lämminvesivaraajat
- paineastiat
- vaihtimen pumpun automatiikka ja ohjaus
- lämpöpumppujen monitorointiin ja ohjaukseen käytettävä automaatio.

10 Säädökset ja rajoitukset

Vesilain (27.5.2011/587) alaisuuteen kuuluvista rakennelmista, tulee hakea vesilupa. Näitä on padon, sillan, vesijohdon, kaapeli tai vesivoiman hyödyntäminen. Kaikissa hankkeissa tulee myös ottaa huomioon vesistön pilaantumisen riskit, joita käsitellään ympäristönsuojelulain nojalla (27.6.2014/527).

Aluehallintovirasto tekee arvion, onko hanke sellainen, että siitä pitää hakea vesilupa. Hankkeet yleensä kuulutetaan julkisesti ja asiantuntijat antavat arvionsa hankkeesta. Myös kaikki asianomaiset saavat kuulla ja vaikuttaa päätökseen. Asianomaisia ovat alueen asukkaat ja yritykset, luvan hakija sekä maanomistajat. Kun kaikkia asianomaisia on kuultu ja asiantuntijat ovat antaneet näkökantansa, aluehallintovirasto tekee asiassa päätöksen.

Päätös on valituskelpoinen ja aluehallinnon päätöksistä valitetaan aina ensin Vaasan hallinto-oikeuteen. Hallinto-oikeuden päätös on myös valituskelpoinen. Silloin asian käsittely siirtyy korkeimpaan hallinto-oikeuteen (KHO) ja KHO:n päätöksestä voi valittaa vain, mikäli saa valitusluvan. Lupakäsittelyn vaiheet on kuvattu alla olevassa kuvassa (kuva 10.) (Vesilain mukainen lupa eli vesilupa 2020.)



Kuva 10. Lupakäsittelyn vaiheet kaaviona. (Vesilain mukainen lupa eli vesilupa 2020.)

11 Vesilaki 27.5.2011/587

Vesilaista (27.5.2011/587) on koottu insinööriyötä koskevat artiklat. Lakitekstit on lainattu suoraan laista.

Lain tavoitteena on ensimmäisen luvun 1 §:n mukaan:

- “edistää, järjestää ja sovittaa yhteen vesivarojen ja vesiympäristön käyttö niin, että se on yhteiskunnallisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä”
- “ehkäistä ja vähentää vedestä ja vesiympäristön käytöstä johtuvaa haittaa”
- “parantaa vesivarojen ja vesiympäristön tilaa.”

Hankelupaa hakevalle voidaan antaa oikeus toisen alueeseen tai sen lunastamiseen toisen luvun 13 a §:n nojalla. Tämä vaatii luvanhakijalta kyvyn todistaa hankkeen edellytykset täytetyiksi ja hanketta voidaan pitää yleishyödyllisenä tai tarpeen vaatimana. Tällaisia hankkeita ovat:

- “energia- ja tai vesihuollon, tietoliikenteen turvaaminen”
- “yleisen virkistyskäytön tai luonnonsuojelun edistäminen”
- “sää- ja vesiolojen ääri-ilmiöihin varautuminen tai valuma-alueen vesitalouden hallintaa”
- “muuhun 1–3 kohdassa vastaavaan merkittävään yleiseen etuun.”

Hankkeesta vastaavan on ilmoitettava kirjallisesti valtion valvontaviranomaisille kolmannen luvun 15 §:n mukaan:

- “5 a §:ssä ja 6 §:n 1 momentissa tarkoitetusta toimenpiteestä”
- “maa-ainesten ottamisesta vesistön pohjasta, jos ottaminen ei 3 luvun 2 tai 3 § mukaan edellytä lupaa”
- “pinta- ja pohjaveden ottamista, jos otettava määrä on yli 100 kuutiometriä vuorokaudessa ja ottaminen ei 3 luvun 2 tai 3 § mukaan edellytä lupaa.”

Kirjallinen ilmoitus on tehtävä pääsääntöisesti vähintään 30 vuorokautta ennen toimenpiteen aloitusta, poikkeuksena 5 a §:ssä tarkoitetussa hankkeessa ilmoitus on tehtävä vähintään 60 vuorokautta ennen toimenpiteen aloittamista. Hankkeesta vastaavan, joka ei ole luonnollinen henkilö, on tehtävä ilmoitus sähköisesti. Valvontaviranomainen voi erityisestä syystä hyväksyä sen myös paperisena. Ilmoituksen tulee sisältää tiedot hankkeesta, sen toteutustavasta ja ympäristövaikutuksista. Jos ilmoitus koskee 6 §:n 1 momentissa tarkoitettua valtaväylää koskevaa toimintaa, ilmoituksen tulee sisältää lisäksi tiedot muista vaikutusalueen suunnitelluista vastaavista hankkeista. (27.5.2011/587 Vesilaki)

12 Johtopäätös

Insinööriyön lähtökohtana oli suunnitella kelluvaan alustaan helposti huollettava ja varmatoiminen lämpöpumppujärjestelmä, jonka vaihdin upotetaan vesistöön ja nostetaan alustalle huoltoon. Tämä on nykyisin jo helposti tehtävissä pumppujen osalta, mutta työn suurin ongelma oli suuren vaihtimen sijoittaminen vedenalle ja nostaminen huoltotöihin. Työ saatiin toteutettua toimivalla lopputuloksella, vaikka salassapitosopimuksen takia ammattikorkeakoulusta saatava ohjaus oli rajoitetusti saatavilla.

Nostaminen ja huoltotyö saatiin insinööriyössä ratkaistua teoreettisesti. Työn lopputulos on mahdollista toteuttaa ja ylläpitää suunnitellusti jopa nopealla aikataululla. Prosessimitoituksen laski Miska Puska (2021) Insinööriyössään, jonka nimi on ”Vesistön lämpöenergian hyödyntäminen kelluvan lämmönsiirtimen avulla” insinööriyössään. Näitä kahta työtä tarkasteltaessa voidaan katsoa insinööriyön onnistuneen kokonaisuutena. Bluet Oy:lle saatiin suunniteltua tapa tuottaa lämpöä ja jäähdytystä kokonaan kelluvan ratkaisun avulla.

Lähteet

Cengel, Younus A; Boles, Michael A. & Kanoglu, Mehmet. 2018. Thermodynamics: An Engineerin Approach. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education.

Cengel, Yuonus A. 2017. Fundamentals of Thermal-Fluid sciences. New York: McGraw-Hill Education.

Cengel, Yuonus A. & Ghajar, Afshir J. 2017. Heat and Mass Transfer fundamentals and applications. E-kirja. McGraw-Hill Education.

Energiatehokas lämmönsiirto. 2016. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/files/11078/Energiatehokas_lammonsiirto_opas.pdf> Luettu 04.01.2021

KSB. 2021. Verkkoaineisto. KSB. <<https://www.ksb.com/fi-fi5>> Luettu 04.05.2020.

Leino, Tapio; Häkkä-Rönholm, Eva; Nieminen, Jyri; Koukkari, Heli; Hieta, Jouni; Vesikari, Erkki & Törqvist, Jouko. 1998. Teräsrakenteiden käyttöikäsuunnittelu. VTT. Espoo: Libella Painopalvelu Oy.

Lämpöpumppujen hankintaopas kunnat ja taloyhtiöt. 2018. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/files/14752/Lampopumppujen_hankintaopas_kunnat_ja_taloyhtiöt.pdf> Luettu 12.5.2021.

Lämpöä ilmassa. Verkkoaineisto. Motiva.<<https://www.motiva.fi/files/175/Ilmalampopumput.pdf>> Luettu 01.08.2021.

Marinetek Oy. 2019. Verkkoaineisto. Marinetek Oy. <<https://www.marinetek.fi/laiturit/tarvikkeet/laituriponttonit/>> Luettu 15.9.2020.

Pekkala, R. 2012. Suomela - Oman talon käsikirja. Helsinki: Readme.fi.

Petriläinen, Kimmo. 2016. Ilmalämpöpumppu. Insinööriyö. Saimaan Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Puska, Miska. 2020. Vesistön lämpöenergian hyödyntäminen kelluvan lämmönsiirtimen avulla. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Referenssit. Verkkoainesto. Bluet Oy. <<https://bluet.fi/referenssit/>> Luettu 1.4.2020.

Vesilain mukainen lupa eli vesilupa. 2020. Verkkoaineisto. AVI. <https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Vesilupa> Luettu 04.12.2020.

Vesilaki. 2011. 27.5.2011/587.

WHCEP Mega. Verkkoaineisto. Geopipe Oy. <<https://www.geopipe.fi/fi-FI/tuotteet/whcep-mega-37543954>> Päivitetty 2016. Luettu 14.08.2020.