

SAVONIA



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN ALA

SULASUOLATESTIJÄRJESTEL- MÄN SUUNNITTELU

TEKIJÄ Mikko Manunen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn tekijä Mikko Manunen		
Työn nimi SULASUOLATESTIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU		
Päiväys	21.5.2025	25/7
Yhteistyötaho Savonia-ammattikorkeakoulu Varkauden kampus		
<p>Opinnäytetyön taustalla oli energiantuotantoteollisuudessa tapahtunut suurempi kiinnostus ja kehitystyö sulasuolan käytössä lämmönsiirtoaineena ja lämmönvarastoinnissa. Etenkin sulasuolan käyttö keskittävissä aurinkovoimaloissa ja lämmönvarastoinnissa on aiheuttanut keskustelua energiantuotantoteollisuudessa. Taustalla oli myös neljännen sukupolven ydinreaktoreiden kehitys ja tutkimustyössä tapahtuneet suuret muutokset viimeisten vuosien aikana käytettäessä sulasuolaa lämmönsiirtoaineena. Alkuperäinen idea opinnäytetyön aiheesta saatiin verkkojulkaisuista ja YouTube-videoista, joissa käsiteltiin edellä mainittuja aiheita. Työn tilaajaksi valikoitui Savonia-ammattikorkeakoulu Varkauden kampus aiheen kiinnostavuuden takia ja koska oppilaitoksella on pitkä kokemus energiantekniikan opetuksesta. Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä alustava suunnitelma sulasuolatestijärjestelmän toteuttamisesta työn tilaajalle. Tarkoituksena oli laatia sopiva kokonaisuus, joka antaa hyvän pohjan sulasuolatestijärjestelmästä toteuttamisesta varten ja katsauksen tämänhetkisistä ratkaisuksista putkiston ja instrumentoinnin osalta. Aihe oli hyvin ajankohtainen ja tämä antaisi työntilajalle ja opiskelijoille mahdollisuuden saada kokemuksia sulasuolan käytöstä energiatekniikassa. Tämä oli myös syy, minkä takia tämä opinnäytetyö haluttiin tehdä.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin työn tekijän omilla laitteilla ja valitsemilla ohjelmilla. Sulasuolan valinnalle, suunnittelun lähtötiedoille ja alustava laitteiston koolle suunniteltiin raja-arvot työntilajajan kanssa. Suunnittelussa, PI-kaavoissa, instrumentoinnissa ja laitteistossa käytettiin olemassa olevia standardeja. Laitteiston ja instrumentoinnin valinnoissa käytettiin apuna laitetoimittajaa.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena valittiin sopiva sulasuola, jonka pohjalta luotiin PI-kaaviot ja suunnittelun lähtötiedot. Lähtötietojen perusteella laskettiin tarvittavat massavirrat ja virtausnopeudet laitteiston valintaa varten. Laitteiston ja instrumentoinnin saatavuus selvitettiin ja valinta suoritettiin laitetoimittajien kanssa yhteistyössä. Näiden tietojen pohjalta luotiin lopullinen PI-kaavio, laitteistolista, alustava kustannusarvio ja ajo- ja käyttöohje testijärjestelmälle. Laitteiston valinnassa ja saatavuudessa havaittiin haastavuuksia käyttökohteen pienestä koosta ja korkeasta lämpötilasta johtuen. Osa laitteista oli vain saatavilla tilaustyönä. Testijärjestelmän toteuttamiseksi tarvitaan jatko suunnittelua ja tarkempia laskentoja laitteistolle.</p>		
Avainsanat Sulasuola, lämmönsiirto, lämmönsiirtoaine		

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	5
2	TEORIA.....	6
2.1	Johtuminen.....	6
2.2	Konvektio.....	6
2.3	Lämpösäteily.....	6
2.4	Lämpöenergian siirto testijärjestelmässä.....	7
2.5	Sulasuolan käyttö energiantuotannossa.....	8
2.6	Testi järjestelmän suunnittelu.....	10
3	SUOLAN VALINTA.....	11
4	SUUNNITTELUN LÄHTÖ TIEDOT.....	12
5	PI-KAAVIOT.....	13
6	TESTIJÄRJESTELMÄN TOIMINTAPERIAATI.....	14
7	MASSAVIRRAN JA VIRTAUSNOPEUDEN LASKEMINEN SUUNNITTELUA VARTEN.....	16
7.1	Massavirran laskenta.....	16
7.2	Virtausnopeuden laskenta.....	17
8	LAITTEISTO.....	18
8.1	Putkiuuni.....	18
8.2	Säiliö.....	19
8.3	Venttiilit.....	19
8.4	Putkisto ja liitokset.....	19
8.5	Muut tilaustyönä teetettävät laitteet.....	20
9	INSTRUMENTOINTI.....	21
9.1	Lämpötilamittaukset.....	21
9.2	Painemittaukset.....	21
9.3	Virtausmittaukset.....	21
9.4	Näkölasi paluu putkistoon.....	21
10	TYÖNTILAAJALLE TOIMITETTAVAT LISTAUKSET JA RAPORTIT.....	22
11	TURVALLISUUTEEN JA TESTIAJOON LIITTYVÄT HUOMIOT.....	23
12	POHDINTAA.....	24
	LÄHTEET.....	25

LIITE 1: SQM'S THERMAL-SOLAR SALT ESITE	27
LIITE 2: ALUSTAVA PI-KAAVIO SULASUOLA TESTIJÄRJESTELMÄ	34
LIITE 3: LOPULLINEN PI-KAAVIO SULASUOLA TESTIJÄRJESTELMÄ	34
LIITE 4: LÄMMÖNSIIRTO LASKELMAT EXCEL.....	34
LIITE 5: LAITELISTAT EXCEL.....	34
LIITE 6: ALUSTAVA KUSTANNUSARVIO	34
LIITE 7: AJO- JA KÄYTTÖOHJEITA TESTIJÄRJESTELMÄLLE.....	34

1 JOHDANTO

Energiatuotanto teollisuudessa on kehitteillä ja tutkimuksen kohteina useita uusia järjestelmiä, joilla siirretään ja varastoidaan lämpöenergia sulasuolan avulla. Sulasuolan lämmönsiirto teoria on hyvin tunnettua mutta käyttökohteena vielä vähäistä. Tällä hetkellä sulasuolaa suurimpana käyttökohteena on keskittävät aurinkovoimalat, joissa sulasuolaa käytetään lämmönsiirtoaineen ja lämmön varastoinnissa. Uutena kehityksen kohteena on neljännen sukupolven ydinreaktorit, joissa polttoaine voidaan sekoittaa sulasuolan joukkoon, mikä parantaa reaktorin ominaisuuksia ja vähentää mekaanisten turvajärjestelmien käyttöä. Sulasuolan käytännön kokemukset ovat vielä vähäisiä etenkin verrattuna höyryn ja veden käyttöön energiantuotannossa.

Tästä muutoksesta on myös lähtöisin tämän opinnäytetyön aihe etenkin sulasuolan käyttö ydinvoimaloissa. Työn tarkoituksena on luoda alustava suunnitelma, jonka pohjalta voidaan luoda testijärjestelmä, jossa käytetään sulasuolaa lämmönsiirtoaineena. Testijärjestelmällä on tarkoitus kouluttaa sulasuolan käyttöä lämpöenergian siirtoaineena ja erilaisten laitteiden käyttöä ja testausta opetusympäristössä. Työssä myös selvitetään käyttökohteeseen sopivan laitteiston saatavuuksia.

Työn alkuperäisen idean pohjalta työtilaajaksi valikoitui Savonia-ammattikorkeakoulun Varkauden kampus. Savonialla on pitkät perinteet energiatekniikan koulutuksessa Varkaudessa ja koululla on myös erittäin vahvat suhteet paikallisiin suunnittelutoimistoihin, jotka toimivat energiantuonta- ja seluteollisuudessa.

Savonia-ammattikorkeakoulun Varkauden kampuksella on oma energiantutkimuskeskus, jossa voidaan tehdä esimerkiksi koulun omassa arina- ja leijupetikattilassa polttoaineen polttoon liittyviä tutkimuksia ja savukaasuanalyyskejä. Savukaasuanalyyskejä tehdään myös asiakkaiden omissa laitoksissa. Laboratoriossa tehdään mm. polttoaineen lämpöarvoon liittyviä tutkimuksia ja leijupetikattilan petimateriaalitutkimuksia.

2 TEORIA

Lämpövirta syntyy, kun kahdella väliaineella on eri lämpötilat ja ne joutuvat vuorovaikutukseen. Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiolla tai lämpösäteilynä. Johtuminen tapahtuu kiinteissä tai levossa olevissa kappaleissa. Konvektio syntyy kiinteän ja virtavan aineen välillä. Lämpösäteilyssä ei ole tarvetta väliaineelle koska lämpö siirtyy lämpösäteilynä aineiden välillä. Monissa tapauksessa lämpö siirtyy useammalla eri tavalla ja nämä tulisi käsitellä omina kokonaisuuksina. (Wagner 1988, 12.)

2.1 Johtuminen

Lämpötilaero aiheuttaa stationarisessa aineessa, nesteessä tai kaasussa lämmönjohtumista molekyylien välityksellä. Lämmönjohtuminen tapahtuu yleensä vain kiinteissä aineissa ja harvoin nesteissä tai kaasuissa. Stationaarinen lämmönjohtuminen lasketaan käyttäen Fourierin lakia. Tästä hyvänä esimerkkinä on, kun lasketaan lämmönsiirtiminen seinämän läpi kulkeva lämpömäärä, jonka mahdollistaa aineen tuoma jatkuva lämmön ylläpito. (Wagner 1988, 15.)

Metalleissa lämpö johtuu kahdella eri tavalla: molekyylien värähtelyn välityksellä ja vapaiden elektronien avulla. Sähköä johtavien metallien lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin eristeillä ja näin ollen lämmönjohtavuus on lähes suoraan verroellinen sähkönjohtavuuteen. Näin ollen lämmönjohtavuus voidaan laskea sähkönjohtavuuden avulla. (Wagner 1988, 16.)

Kaasuissa ja höyryissä lämpö johtuu molekyylien liike-energian ja molekyylivärähtelyn avulla. Lämmönjohtavuuden laskennassa kaasuilla ja höyryillä käytetään aineen ominaislämpökapasiteettia ja viskositeettia. (Wagner 1988, 16.)

2.2 Konvektio

Konvektio on aineen liikkumiseen perustava lämmön kuljetus. Konvektio voi olla joko pakkokonvektiota, jossa aineen virtauksen aiheuttaa esimerkiksi pumppu tai vapaata konvektio, jossa lämpimämpi aine kohoaa tiheyserojen perusteella, jolloin syntyy virtaus ylöspäin esimerkiksi säiliötä, jonka pohjaa lämmitetään. Ideaalitalanteessa, jossa nesteen virtaus on turbulენტista, tällöin lämpö siirtyy huomattavasti paremmin konvektion avulla ja voimakkaan sekoittumisen ansiosta lämpö siirtyy aineen sisällä erittäin hyvin ja lämmön luovutus on erittäin lineaarinen. Tällöin myös rajapintaan ei muodostu termistä rajakerrosta, jossa virtaus on laminaarista ja lämpö siirtyy johtumalla rajapinnan lävitse. (Wagner 1988, luku 3.)

2.3 Lämpösäteily

Lämpösäteily on sähkömagneettisen aaltojen välityksellä siirtyvää energiaa. Kun lämpötila nousee korkeaksi, lämpösäteily tulee näkyväksi valoksi. Lämpösäteilyn aallonpituus on yleensä 0,8 - 400 μm . Energian säilymisen perusteella kappale joko absorboi lämpösäteilyä, jolloin lämpösäteily muuttuu lämpöenergiaksi sähkömagneettisten aaltojen välityksellä tai menee sen läpi tai heijastaa sitä. Näin ollen kiinteät ja nestemäiset kappaleet voidaan luokitella esimerkiksi mustaksi kappaleeksi, joka absorboi kaiken lämpösäteilyn tai valkoiseksi, joka heijastaa kaiken säteilyn. (Wagner 1988, luku 6.)

2.4 Lämpöenergian siirto testijärjestelmässä

Lämpö siirtyy johtumalla tai lämpösäteilynä putkiuunista putkeen ja putken seinämän läpi johtumalla sisällä virtaavan sulasuolaan, joka siirtää lämpöä konvektiolla ja virtaus on turbulენტtista putkiston mutkien läheisyyden takia (Wagner 1988). Laskennassa oletetaan, että putkilämmitin pystyy siirtämään kaiken lämpöenergian suoraan sulasuolaan.

Lämpöenergia muunnetaan laitteiston mitoitusta varten massavirraksi ja virtausnopeudeksi, joka laskettiin seuraavien kaavojen perusteella, kun tiedossa oli lämpöteho (Φ), väliaineen ominaislämpökapasiteetti (c), haluttu lämpötila muutos väliaineessa (Δt) ja putkiston poikkipinta-ala (A).

Massavirran laskenta johtamalla kaavasta (kaava 1).

$$\Phi = q_m c \Delta t, \text{ missä} \quad (1)$$

- Φ (W) on lämpöteho
- q_m (kg/s) on massavirta
- c (J/kg°C) on aineen ominaislämpökapasiteetti
- Δt (°C) on lämpötila ero

(Tekniikan kaavasto 2017, 111.)

Virtausnopeuden laskenta johtamalla kaavasta (kaava 2).

$$q_m = \rho A v, \text{ missä} \quad (2)$$

- q_m (kg/s) on massavirta
- ρ (kg/m³) on nesteen tiheys
- A (m²) on poikkipinta-ala
- v (m/s) on virtausnopeus

(Tekniikan kaavasto 2017, 99.)

Poikkipinta-ala laskettiin kaavalla (kaava 3).

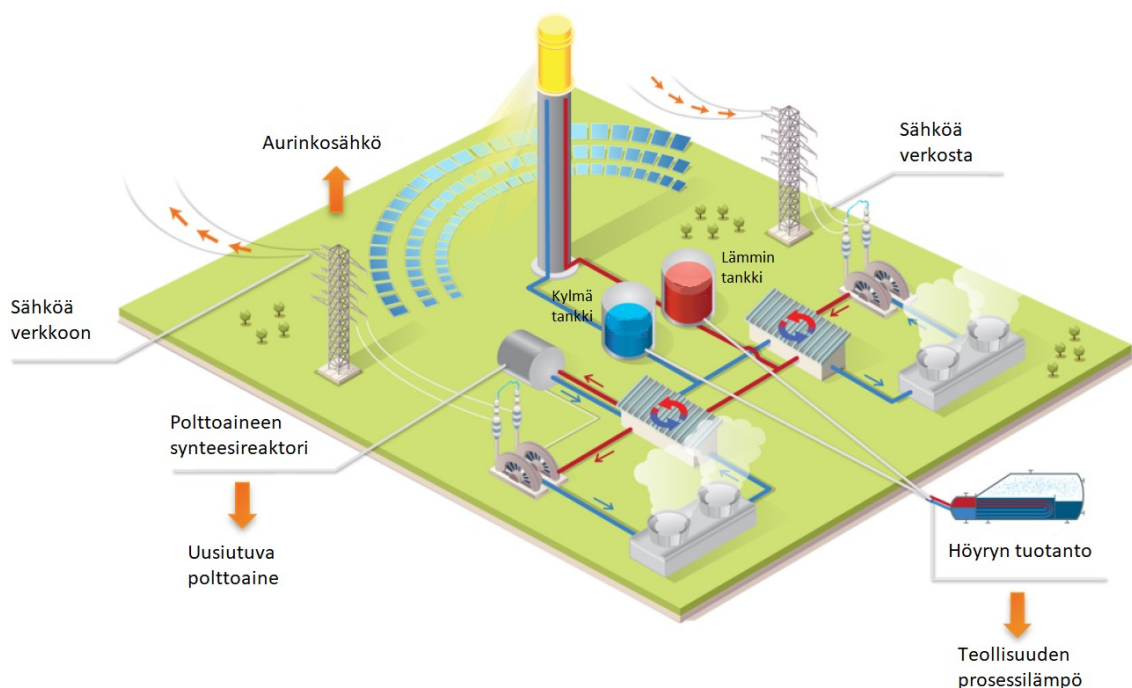
$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ missä} \quad (3)$$

- A (m²) on pinta-ala
- d (m) on ympyrän sisähalkaisija

(Tekniikan kaavasto 2017, 18.)

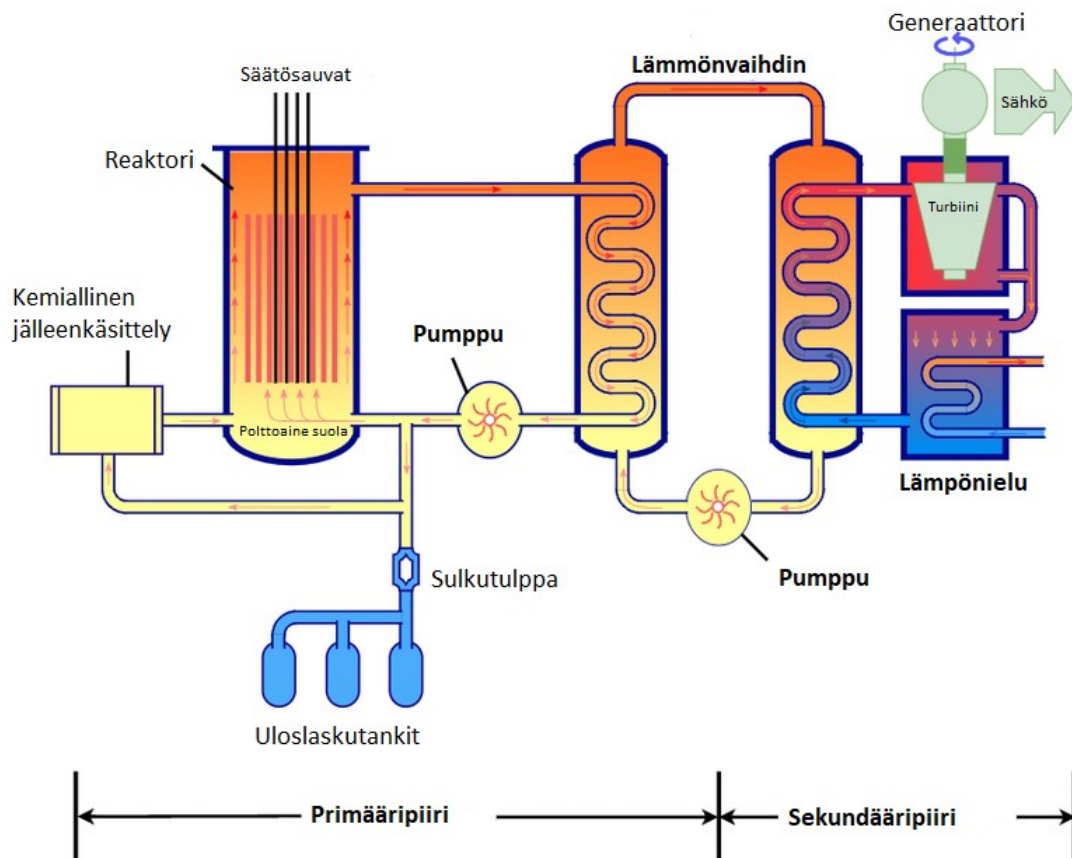
2.5 Sulasuolan käyttö energiantuotannossa

Sulasuolan käyttö on yleistynyt energiantuotannossa viime vuosikymmen aikana. Kuten esimerkiksi keskittävässä aurinkovoimalassa (eng. Concentrating Solar Power CSP), jossa auringonvalo heijastetaan peilien avulla keskellä olevaan torniin. Tornin yläosassa lämmitetään sulasuola jopa 600°C. Sulasuola joko varastoidaan lämpöenergia varastoon tai käytetään höyryn tuotantoon, joka pyörittää tavanomaista höyryturbiinia. (Kraemer 2018; Kuva 1.)



Kuva 1. Keskittävä aurinkovoimala (U.S. Department of Energy n.d.)

Maailmalla on suunnitteilla ja rakenteilla sulasuolahyötöreaktoreita (eng. Molten Salt Breeder Reactor MSBR), joissa lämmönsiirto aineena toimii sulasuola, johonka on polttoaine liotettu mukaan primääripiirissä. Lämpö johdetaan lämmönsiirtimellä primääripiiristä sekundääripiiriin. Sekundääripiiri on vain pelkkää sulasuola. Sekundääripiiriin lämpöä voidaan käyttää sähköntuotannossa tai muissa lämpöenergiaan tarvitsevilla kohteilla. Tämän tyyppisessä sulasuolahyötöreaktorissa polttoaineena on yleensä torium-232 joka muuntuu reaktorissa uraani-233:ksi. Tämän tyyppisten reaktoreiden hyvinä puolina on passiivinen turvallisuusjärjestelmä, joka perustuu fysiikkaan ja ei tarvitsi ihmisen väliin tuloa. Tästä hyvänä esimerkkinä on sulkutulppa (eng. freeze plug) joka sijaitsee reaktorin pohjassa (kuva 2). Tämä on samaa suola kuin primääripiirissä, joka on jäädytetty jäähdytysjärjestelmällä ja jos reaktorin lämpötila nousee liian korkeaksi tai jäähdytysjärjestelmässä tulee vika niin sulasuola sulattaa sulan ja primääripiirissä oleva sulasuola valuu painovoiman ansiosta reaktorin alla oleviin uloslaskutankkeihin, jossa sulasuola lauhtuu passiivisesti ja polttoaineen fissio loppuu kokonaan. (Midgley 2025; kuva 2.)



Kuva 2. Sulasuolahyötöreaktorin konsepti (Wang ym. 20.3.2024, CC BY-NC-ND 4.0)

Kiinassa on rakenteilla sähkötehoaan 10MW ja lämpötehoaan 60MW demonstraatio torium sulasuolahyötöreaktori. Tämä on jatketta 2MW:n kokeelliseen torium sulasuolan reaktoriin, jonka suunniteltu käyttöönotto vuosi on 2030. (Waltz & Chiu 2024.)

Tämän kiinalaisen reaktorin teknologiseksi valmiustasoksi arvioitiin taso TRL 7 (taulukko 1) mukaan. Nämä teknologiavalmiustasot (TRL1-9) ovat alun perin Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallituksen (NASA) kehittämiä, joita muut hallinnot, instituutit ja virastot ovat myöhemmin ottaneet käyttöön arvioidessaan uuden kehitteillä olevan teknologia tasoa. TRL on maailmalla hyvin yleisesti käytetty arviointimenetelmä. (Euroopan unioni 2021.)

Taulukko 1. Teknologian valmiustaso (mukaillen Euroopan unioni 2021)

Valmius- taso	Valmiustason kuvaus
TRL 1	Peruseriaatteita noudatetaan
TRL 2	Teknologinen konsepti muotoiltu
TRL 3	Kokeellinen näyttö toimivuudesta
TRL 4	Teknologia validoitu laboratoriossa
TRL 5	Teknologia validoitu asianmukaisessa ympäristössä
TRL 6	Teknologia osoitettu asianmukaisessa ympäristössä
TRL 7	Järjestelmäprototyypin osoittaminen operatiivisessa ympäristössä
TRL 8	Järjestelmä valmis ja hyväksytty
TRL 9	Varsinainen järjestelmä, jonka on todettu toimivan operatiivisessa ympäristössä

2.6 Testijärjestelmän suunnittelu

Testijärjestelmän suunnittelu perustui hyviin yleisiin suunnittelu periaatteisiin. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon niin väliaineen kuin tilaajan asettamat rajaehdot materiaaleille ja laitteiston koolle. Suunnittelussa tulee käyttää standardien mukaisia merkintöjä kuten esimerkiksi PSK 3605 Prosessiteollisuuden virtaus- ja PI-kaavioiden symbolit (PSK 3605, 2016) standardia ja SFS-ISO 14617-6 Kaavioissa käytettävät piirrosmerkit (SFS-ISO 14617-6, 2004) standardia.

3 SUOLAN VALINTA

Suolan valintaperusteina ovat työntilaajan kanssa yhteistyössä laaditut valintakriteerit seuraavasti: ei saa sisältää myrkyllisiä aineita, saatavuus Euroopasta, operointilämpötila 200–400 °C, putki ja laitemateriaali mieluiten ruostumaton teräs. Tämän pohjalta suolaksi valitaan sqm's thermo-solar salt (liite 1) työntilaajan kanssa, joka täyttää kaikki valinta kriteerit.

Sqm's thermo-solar salt sulamispiste on 221 °C, suositeltava käyttölämpötila n. 260 °C–620 °C, kemiallinen koostumus 60 % natriumnitraatti ja 40 % kaliumnitraatti, ominaislämpökapasiteetti 316°C:ssa 1497 J/kg°C, tiheys 316 °C:ssa 1889,31 kg/m³ ja ei sisällä myrkyllisiä aineita. Tämä suola sopii erittäin hyvin testijärjestelmään edellä mainittujen ominaisuuksien puolesta etenkin, kun sulaa voidaan käyttää normaalissa ilmanpaineessa. (Liite 1.)

Toinen suola vaihtoehto on Dynalene molten salt MS-2, jonka sulamispiste on 130 °C, maksimi operointi lämpötila 485 °C, ei myrkyllinen, korrosio testattu materiaalilla SS-316 ja ominaislämpökapasiteetti 1,59 j/gK. Saatavilla ainoastaan Yhdysvalloista ja tämä oli syy minkä takia suolaa ei valittu. (Dynalene 2020.)

Kolmas suola vaihtoehto on Yaran Solar Power Molten Salt NitCal-K™, jonka sulamispiste on 131 °C ja kemiallinen koostumukseltaan kalsium- ja kaliumnitraatti (Yara 2025). Julkisia tietoja on hieman vähän ja tarkemmat tiedot pyydettävä erikseen. Tätä suolaa ei valittu hieman alhaisen sulamispisteen takia ja vähäisten verkkojulkaisun sisältävien tietojen takia mutta muuten varteenotettava vaihtoehto suolalle.

Korkeimmille lämpötiloille yhtenä vaihtoehtona on litiumfluoridi berylliumfluoridi suolaa (FLi-BeF₂) jota on suunniteltu käytettäväksi esimerkiksi fuusioreaktorissa lämmönsiirtoaineen. Litiumfluoridi berylliumfluoridi suola (FLi-BeF₂) on moolitasapainoltaan 66 % litiumfluoridia ja 34 % berylliumfluoridia. Tämän suolan sulamispiste on 459 °C ja suunniteltu operointilämpötila on 600–700 °C. (Oak Ridge National Laboratory 2024.)

4 SUUNNITTELUN LÄHTÖTIEDOT

Sulasuolatestijärjestelmä suunniteltiin työntilaaajan toiveiden mukaisesti. Toiveet olivat, että järjestelmä on helppo käyttää, ei sisällä vaarallisia materiaaleja tai aineita, laitteisto/suola olisi saatavilla Euroopasta ja että järjestelmällä voidaan testata laitteita, kuten esimerkiksi lämmönvaihtimia.

Suunnittelun perustana käytettiin kampuksen putkiuuni (kuva 5) lämmönlähteenä, joka on molemmista päistä avonainen uuni, jossa putkea voidaan kuumentaa haluttuun lämpötilaan. Lämmönsiirtoaineeksi valittiin sqm's thermo-solar salt (liite 1) nämä valittiin työntilaaajan kanssa. Näiden lähtökoh-
tien perusteella valittiin suunnitelmaan lähtöarvot (taulukko 2).

Taulukko 2. Suunnittelun lähtöarvot

Materiaali	1.4541 / 1.4878 / 321 / 321H / 08Cr18Ni10Ti (Stainless Europe n.d.)
Minimilämpötila	0 °C
Käyttölämpötila	316 °C
Maksimilämpötila	400 °C
Maksimilämpötila ero	Δt 50 °C
Suunnittelupaine	5bar
Käyttöpaine	2bar
Putken koko	DN15 (Stainless Europe n.d.)
Putken kiinnitys	Laippa
Lämpöteho	3000W
Laitteiden asennus	PSK standardin mukaisesti, jos sellaista on mahdollista käyttää

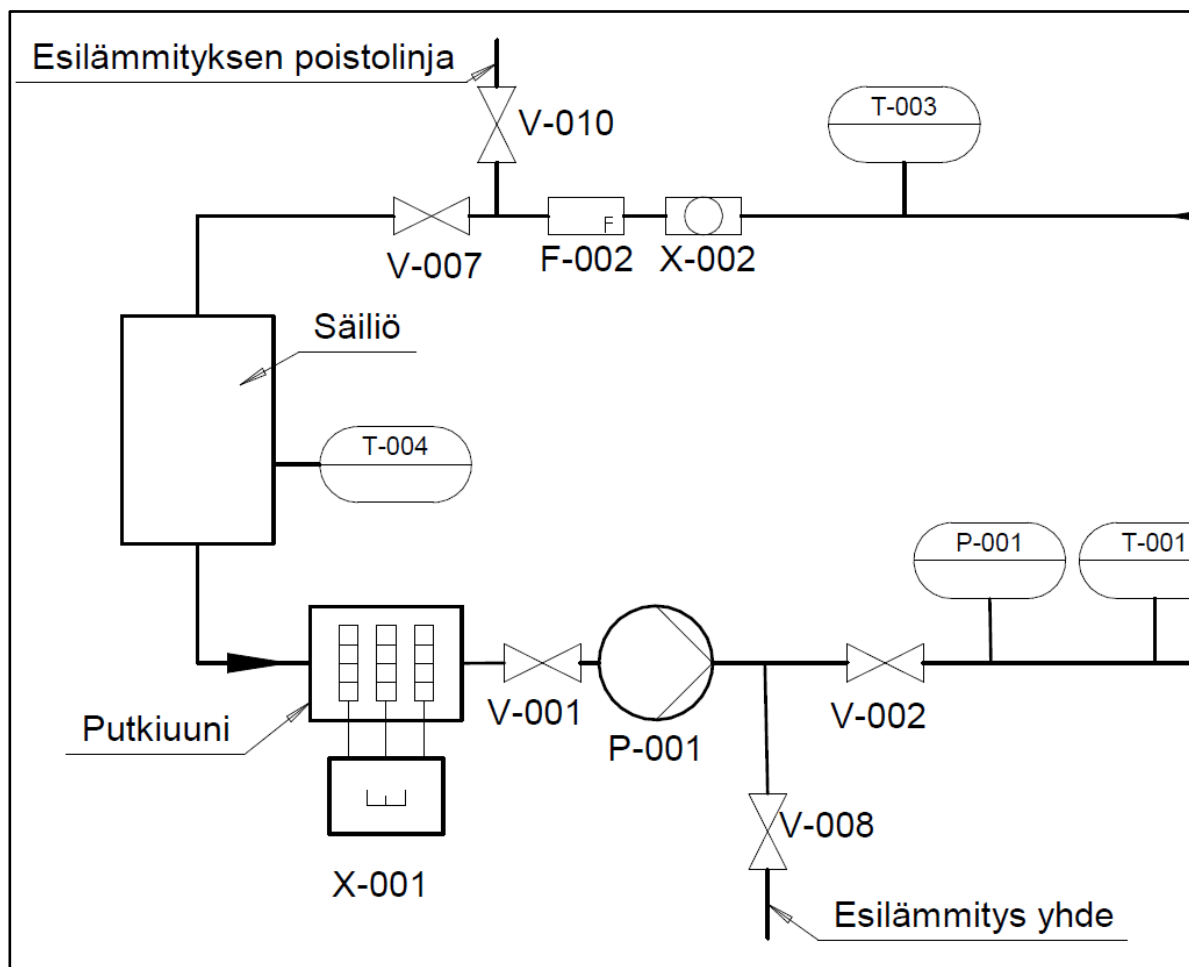
5 PI-KAAVIOT

Alustava PI-Kaavio (liite 2) luotiin PSK 3605 standardin (PSK 3605, 2016) mukaisilla symboleilla, SFS-ISO 14617-6 (SFS-ISO 14617-6, 2004) standardin mukaisia instrumentointimerkintöjä käyttäen ja seuraavien kriteerien perusteella kaikki mittaukset luettavissa automaatiolla, säiliö suolalle optio esilämmitykselle/sulatus, painemittaus ennen kiertopumppua, lämpötila- ja virtausmittaus putkilämmittimelle, venttiilit kiertopumpulle, järjestelmän tyhjennys linja venttiilillä, lämmönsiirrin venttiileillä ja lämpötilamittauksella, lämmönsiirtimen ohitus venttiilillä ja virtausmittauksella, paluu linja säiliöön virtaus-, lämpötilamittauksella, näkölasioptio konenäölle ja venttiili. Instrumentointi merkinnöissä käytettiin SFS-ISO 14617-6 (SFS-ISO 14617-6, 2004) mukaisia merkintöjä.

Lopullinen PI-Kaavio (liite 3) luotiin PSK 3605 standardin (PSK 3605, 2016) mukaisilla symboleilla ja SFS-ISO 14617-6 (SFS-ISO 14617-6, 2004) standardin mukaisia instrumentointi merkintöjä käyttäen. Lopulliseen PI-Kaavioon lisättiin meno- ja paluulinja venttiileillä putkiston esilämmitys varten olevalle ilmaa lämmittävälle lämmittimelle ja tarkennettiin instrumenttien merkintöjä.

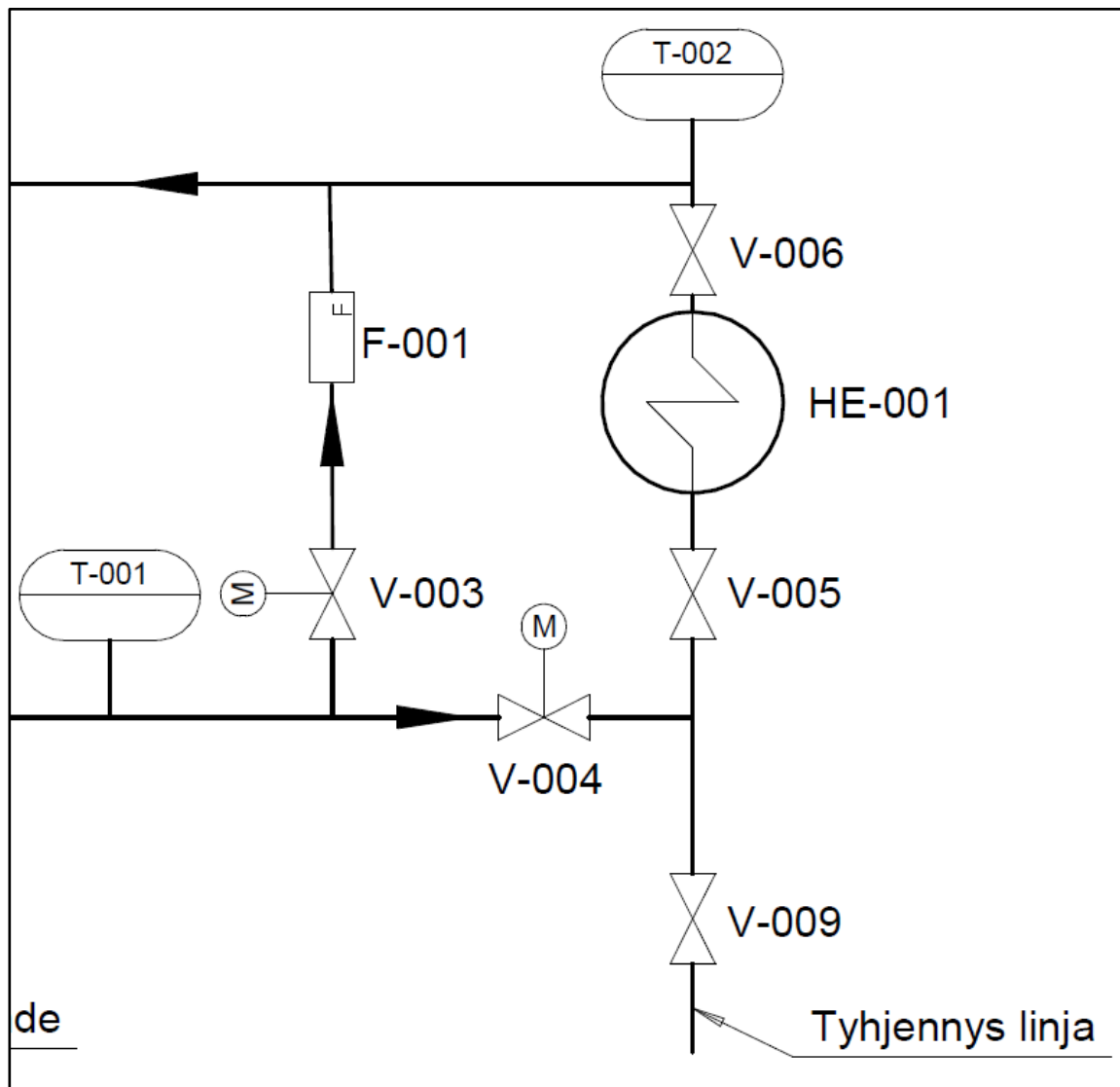
6 TESTIJÄRJESTELMÄN TOIMINTAPERIAATE

Testijärjestelmän toimii siten, että säiliö täytetään aluksi suolalla. Suola sulatetaan putkiuunin avulla sulaksi ja jos säiliöön on asennettu lämmityselementit, niitä käytetään myös suolan sulattamiseen. Putkisto ja muut osat voidaan esilämmittää esilämmitys yhteiseen liitettävällä lämmittimellä. Kun suola on sulanut ja putkisto ja muut laitteet ovat valmiita testiajoon niin sammutetaan säiliössä mahdolliset olevat lämmityselementit, irrotetaan esilämmitys, suljetaan esilämmityksen venttiilit, avataan tarvittavat venttiilit, jotta sulasuola voi kiertää testijärjestelmässä ja käynnistetään pumppu P-001. (kuva 3).



Kuva 3. Testijärjestelmän alkuosa

Testiajon aikana venttiileillä V-003 ja V-004 voidaan säätää lämmönsiirtimen HE-001 läpimenevän virtauksen määrää ja jos testijärjestelmään on asennettu näkölasi X-002, tästä voidaan seurata sulasuolassa tapahtuvia muutoksia, kuten kiteytymistä tai ilmakuplia. Kun tarvittavat testiajot on saatu tehtyä, niin testijärjestelmä tyhjenetään aluksi sammuttamalla pumppu P-001. Tyhjennys linjaan liitetään astia, johonka sulasuola valuu, kun avataan venttiili V-009. Lämmönsiirtimen HE-001 tilalla voidaan käyttää muita testattavia laitteita tai instrumentteja. (kuva3; kuva 4.)



Kuva 4. Testijärjestelmän loppuosa

7 MASSAVIRRAN JA VIRTAUSNOPEUDEN LASKEMINEN SUUNNITTELUA VARTEN

7.1 Massavirran laskenta

Massavirta lasketaan usealla eri lämpöteholla ja usealla eri lämpötilaerolla (taulukko 2) ja tarkemmat laskelmat löytyvät liitteen olevasta excel taulukosta (liite 4). Laskentaa laajennettiin alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen, jotta työntilaaaja voi tarvittaessa muuttaa testijärjestelmän kokoa halutesaan. Eri lämpötila erot ja lämpötehot olivat annettuja tietoja taulukon (taulukko 3) mukaan. Vastavan lämpötila eron arvo saadaan testijärjestelmästä ajon aikana lämpötilamittauksista, jossa lähtölämpö on mittaus TI-001 kohdasta ja paluulämpötila on mittaus TI-003 kohdasta (liite 3). Massavirrat lasketaan taulukkoon (taulukko 3) kaavan (kaava 4) mukaan muuttamalla kaava (kaava 1) muotoon.

$$q_m = \frac{\Phi}{c\Delta t}, \text{ missä} \quad (4)$$

- Φ on tauluko 2. mukaan
- c_p on 1490 J/kg°C 316°C lämpötilassa (Liite 1)
- Δt on tauluko 2. mukaan

Taulukko 3. Massavirran q_m (kg/s) laskenta.

Lämpöteho Φ (W)	Lämpötila ero Δt (°C)									
	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
300	0,004	0,0045	0,005	0,0058	0,0067	0,0081	0,0101	0,0134	0,0201	0,0403
800	0,0107	0,0119	0,0134	0,0153	0,0179	0,0215	0,0268	0,0358	0,0537	0,1074
1000	0,0134	0,0149	0,0168	0,0192	0,0224	0,0268	0,0336	0,0447	0,0671	0,1342
1500	0,0201	0,0224	0,0252	0,0288	0,0336	0,0403	0,0503	0,0671	0,1007	0,2013
2000	0,0268	0,0298	0,0336	0,0384	0,0447	0,0537	0,0671	0,0895	0,1342	0,2685
2500	0,0336	0,0373	0,0419	0,0479	0,0559	0,0671	0,0839	0,1119	0,1678	0,3356
3000	0,0403	0,0447	0,0503	0,0575	0,0671	0,0805	0,1007	0,1342	0,2013	0,4027
3500	0,047	0,0522	0,0587	0,0671	0,0783	0,094	0,1174	0,1566	0,2349	0,4698
4000	0,0537	0,0597	0,0671	0,0767	0,0895	0,1074	0,1342	0,179	0,2685	0,5369
4500	0,0604	0,0671	0,0755	0,0863	0,1007	0,1208	0,151	0,2013	0,302	0,604
5000	0,0671	0,0746	0,0839	0,0959	0,1119	0,1342	0,1678	0,2237	0,3356	0,6711
5500	0,0738	0,082	0,0923	0,1055	0,123	0,1477	0,1846	0,2461	0,3691	0,7383
6000	0,0805	0,0895	0,1007	0,1151	0,1342	0,1611	0,2013	0,2685	0,4027	0,8054
10000	0,1342	0,1491	0,1678	0,1918	0,2237	0,2685	0,3356	0,4474	0,6711	1,3423
15000	0,2013	0,2237	0,2517	0,2876	0,3356	0,4027	0,5034	0,6711	1,0067	2,0134
20000	0,2685	0,2983	0,3356	0,3835	0,4474	0,5369	0,6711	0,8949	1,3423	2,6846
25000	0,3356	0,3729	0,4195	0,4794	0,5593	0,6711	0,8389	1,1186	1,6779	3,3557
30000	0,4027	0,4474	0,5034	0,5753	0,6711	0,8054	1,0067	1,3423	2,0134	4,0268

7.2 Virtausnopeuden laskenta

Virtausnopeus lasketaan putki kokoon DN15 mukaan, joka on valittu työntilaaajan kanssa testijärjestelmän putkien kooksi. Tämä koko valitaan siksi, että järjestelmän koko pysyy pienenä ja että tarvittava suolan määrä ei kasvaisi suureksi. Putken ulkohalkaisija on 21,3 mm, seinämöpaksuus on 2 mm, materiaali 321 (Stainless europe n.d.). Muihin eri putkikokoihin perustuvat laskennat lasketaan liitteenä olevaan excel laskentataulukoon (liite 4). Nämä muut putkikokolaskelmat antavat työntilaaajalle mahdollisuuden käyttää toisti putkikokoa, jos haluavat muuttaa testijärjestelmän kokoa isommaksi alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen. Putken sisähalkaisija lasketaan vähentämällä ulkohalkaisijasta kaksi kertaa seinämöpaksuus. Putken poikkipinta-ala on laskettuna 0,00024 m² (kaava 3). Laskennassa käytetään kaavaa (kaava 2) muuntamalla kaava muotoon.

$$v = \frac{q_m}{\rho A}, \text{ missä} \quad (5)$$

- q_m on massavirta taulukko 2. mukaan
- ρ on 1889,3 kg/m³ 316°C lämpötilassa (liite 1)
- A on poikki pinta-ala kaava 3. mukaan

Virtausnopeudet lasketaan taulukkoon (taulukko 4) kaavan (kaava 5) mukaan. Muilla lämpötehoilla ja lämpötilaeroilla tehdyt laskennat antavat työntilaaajalle tarvittavat arvot, jos testijärjestelmää halutaan ajaa eri lämpötilaerolla tai kasvattaa lämpölähteen kokoa alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen.

Taulukko 4. Virtausnopeus (m/s) DN15 putkikoolla

Lämpöteho Φ (W)	Lämpötila ero Δt (°C)									
	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
300	0,0091	0,0101	0,0113	0,0130	0,0151	0,0181	0,0227	0,0302	0,0453	0,0907
800	0,0242	0,0269	0,0302	0,0345	0,0403	0,0484	0,0604	0,0806	0,1209	0,2418
1000	0,0302	0,0336	0,0378	0,0432	0,0504	0,0604	0,0756	0,1007	0,1511	0,3022
1500	0,0453	0,0504	0,0567	0,0648	0,0756	0,0907	0,1133	0,1511	0,2267	0,4534
2000	0,0604	0,0672	0,0756	0,0864	0,1007	0,1209	0,1511	0,2015	0,3022	0,6045
2500	0,0756	0,0840	0,0945	0,1079	0,1259	0,1511	0,1889	0,2519	0,3778	0,7556
3000	0,0907	0,1007	0,1133	0,1295	0,1511	0,1813	0,2267	0,3022	0,4534	0,9067
3500	0,1058	0,1175	0,1322	0,1511	0,1763	0,2116	0,2645	0,3526	0,5289	1,0579
4000	0,1209	0,1343	0,1511	0,1727	0,2015	0,2418	0,3022	0,4030	0,6045	1,2090
4500	0,1360	0,1511	0,1700	0,1943	0,2267	0,2720	0,3400	0,4534	0,6801	1,3601
5000	0,1511	0,1679	0,1889	0,2159	0,2519	0,3022	0,3778	0,5037	0,7556	1,5112
5500	0,1662	0,1847	0,2078	0,2375	0,2771	0,3325	0,4156	0,5541	0,8312	1,6623
6000	0,1813	0,2015	0,2267	0,2591	0,3022	0,3627	0,4534	0,6045	0,9067	1,8135
10000	0,3022	0,3358	0,3778	0,4318	0,5037	0,6045	0,7556	1,0075	1,5112	3,0224
15000	0,4534	0,5037	0,5667	0,6477	0,7556	0,9067	1,1334	1,5112	2,2668	4,5337
20000	0,6045	0,6717	0,7556	0,8636	1,0075	1,2090	1,5112	2,0150	3,0224	6,0449
25000	0,7556	0,8396	0,9445	1,0794	1,2594	1,5112	1,8890	2,5187	3,7781	7,5561
30000	0,9067	1,0075	1,1334	1,2953	1,5112	1,8135	2,2668	3,0224	4,5337	9,0673

8 LAITTEISTO

8.1 Putkiuuni

Alkuperäisen suunnitelman mukaan lämmön lähteenä toimii Savonia AMK Varkauden kampuksen putkiuuni mallia carbolite CTF 12/75/700 PI-kaavio merkinnältään X-001 (kuva 6; liite 3). Putkiuuni on molemmista päistä avonainen uuni, jossa putken muotoisia kappaleita voidaan lämmitellä jopa 1200°C, jonka lämmitettävän alueen pituus on 700 mm ja halkaisija 75 mm (Norrscope n.d.). Putkiuunia säädetään ja ohjataan etupaneelista (kuva 5).



Kuva 5. Putkiuuni (Manunen 2025)



Kuva 6. Putkiuunin tyyppikilpi (Manunen 2025)

8.2 Säiliö

Säiliö tilavuus riippuu testijärjestelmän putki koosta ja tulee mitoittaa testijärjestelmän mukaan. Säiliön tilavuus tulisi olla tarpeeksi suuri, että putkistoon ei pääsisi ilmaa testien aikana ja että testijärjestelmän täyttövaiheessa saadaan kaikki ilma pois putkistosta. Säiliö tulee suunnitella siten, että se on muodoltaan suorakaide, jonka pohjaan voidaan tarvittaessa asentaa lämmitysvastukset suolan sulattamista varten, pohjaan keskelle lähtöyhde putkistoon liittymistä varten, lämpötilamittaus pystyseinämään ja paluuyhde lämpötilanmittauksen vastakkaiselle seinämälle lähes pohjaan asti ylettyvällä putkella.

8.3 Venttiilit

Venttiileistä keskusteltiin laitetoimittajan kanssa puhelimitse 2.4.2025 näkölasin valintaan liittyvän keskustelun yhteydessä, jonka pohjalta lähetettiin tarkempi kysely sähköpostilla laitetoimittajalle. Venttiilit liitetään laipoilla putkistoon koko DN15. Laitetoimittajan suosituksesta venttiileiksi valitaan Vinco Valves CFM-T DN ja PN16, joka on metallitiivisteinen ja käsikäyttöinen palloventtiili, joka kestää korkeaa lämpötilaa ja kestää hyvin sulasuolan aiheuttamaa kulumista (Vinco Valves CFM-T n.d.). Näihin voidaan myös liittää toimilaita esimerkiksi Protact PR sarjan pneumaattinen toimilaitte, jota ohjataan automaatiojärjestelmällä (Protact PR series n.d.).

Palloventtiilien etuina ovat niiden nopea ja helppo käyttö, minimaalinen painehäviö, vähäinen huollon tarve, erinomainen tiiveys ja tarkka virtauksen säätö. Nämä venttiilit soveltuvat moniin eri käyttökohteisiin edellä mainittujen hyvien ominaisuuksien ansiosta niin teollisuuden kuin perus asuintalojen tarpeisiin. (Dekitek 2023.)

8.4 Putkisto ja liitokset

Putkiston kooksi valitaan DN15, materiaaliksi 321SS ja liitoksiksi laippa työntilaaajan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella. Putkisto tulee eristää hukkalämmön vähentämiseksi, joka parantaa järjestelmän lämmönsiirtoa ja vähentää virheen suuruutta lämmönsiirtimessä HE-001 liittyvissä testeissä. Putkistoon tarvittavat osat katsotaan PI-kaaviosta (liite 3). Laippatiivisteeksi valitaan spiral tal DN15 PN10-40 jos voidaan käyttää 316L materiaalilla olevaa tiivistettä, jota on saatavilla paikalliselta toimittajalta (Etra 2025). Muussa tapauksessa laippojen tiivisteet ovat tilaustyötä, koska toimittajalta ei löydy 321SS materiaalilla olevaa tiivistettä tai tilattava Euroopan ulkopuoliselta toimittajalta käyttökohteeseen sopivia laippojen tiiviste. Putkistoon tarvittavien osien erittely ja kustannusarvio on koottu liitteeseen (liite 6).

Työn tilaaajan pyynnöstä toiseksi vaihtoehdoksi putkistolle ja liitoksille selvitetään, voidaanko käyttää ns. meijeriputkistoa. Tämän putkiston materiaali on AISI 316L (Onninen 2025). Sulasuolan toimittajalta täytyy varmistaa, että voidaanko tämän materiaalin osia käyttää testijärjestelmässä. Valitulla sulasuolalle ei ole tehty korroosiotestausta 316L materiaalille suolan toimittajan toimesta (SQM Europe NV n.d.).

8.5 Muut tilaustyönä teetetettävät laitteet

Pumppu P-001 ja lämmönsiirrin HE-001 rajattiin työn ulkopuolelle niiden tarkemman suunnittelun laajuuden vuoksi ja jos halutaan valittavan suuremmalla lämpöteholla oleva järjestelmä. Työntilaajan harkintaan jäävät tarkemman suunnittelun ja hankinnan toteuttamisesta. Laitteille luotiin paikkavaraukset PI-kaavioihin ja laitelistauksiin. (liite 3; liite 5.)

Lämmönsiirrin HE-001 alustavat suunnittelutiedot DN15 putkikoolla ovat ilma / neste siirrin, tulolämpötila 316 °C, paluulämpötila 266 °C, liityntä laippakiinnityksellä koko DN15 ja lämpöteholtaan 3000W. Tarvittava massavirta saadaan taulukosta (taulukko 3) lämpöteho 3000W ja lämpötilaero 50 °C kohdalta ja tarvittava virtausnopeus saadaan samaisilla arvoilla kuin massavirtakin taulukosta (taulukko 4) putkikoon ollessa DN15.

Pumppu P-001 moottorina on mahdollista käyttää työntilaajan omaa moottoria. Näin ollen erikoistilattavaksi jää pumpun pesä, siipipyörä ja tarvittava akseli, jotta moottori saataisiin tarvittavan kauaksi pumpun pesästä ylikuumenemisvaaran takia. Pumpun pesä ja siipipyörä mitoitetaan samoilla arvoilla kuin lämmönsiirrin HE-001. (liite 3.)

9 INSTRUMENTOINTI

Instrumentointi valikoitiin käyttökohteeseen sopivaksi ja asennetaan PSK 5201 (PSK 5201, 2003) standardin mukaisesti, jos standardista ei löydy käyttökohteeseen sopivaa asennustapaa instrumentille niin muissa tapauksissa instrumentit asennetaan laitekohtaisten ohjeiden mukaan. Instrumenttien valinta suoritetaan yhteistyössä laitetoimittajan kanssa. Erityisen haastavaksi kohteiksi osoittautuivat virtausmittaus ja näkölasin valinta pienen putkikoon tai korkean lämpötilan takia.

9.1 Lämpötilamittaukset

Lämpötilamittauksen mittauslaitteeksi valitaan laitetoimittajan 21.3.2025 käydyn puhelinkeskustelun ja sähköpostiviestin perusteella putken ulkopinnan ja eristeen välistä lämpötila anturilla Aplisens CT-X PT100 ja erillisellä lähettimellä esimerkiksi Aplisens AT-3, jonka lähetyssignaalina on 4–20 mA automaatiota varten (Aplisens AT-3 n.d.). Tämä valinta tehtiin perustuen putkiston pieneen kokoon perustella eikä suoraa mittausta väliaineesta. Määrät, paikat ja tarkemmat tiedot kirjataan lopulliseen PI-kaavioon ja laitelistaan (liite 3; liite 5).

9.2 Painemittaukset

Paineenmittauksen mittauslaitteeksi valitaan laitetoimittajan 21.3.2025 käydyn puhelinkeskustelun perusteella ja sähköpostiviestin perusteella välitin kalvallinen paineenmittaus, jossa paineenmittausanturi siirtyy kauemmaksi putkistosta väliaineen korkean lämpötilan vuoksi. Mittalaitteena voisi toimia esimerkiksi Aplisens PCE-28, jonka lähetyssignaalina on 4–20 mA automaatiota varten (Aplisens PCE-28 n.d.). Määrät, paikat ja tarkemmat tiedot kirjataan lopulliseen PI-kaavioon ja laitelistaan (liite 3; liite 5).

9.3 Virtausmittaukset

Virtausmittaukseen sopivan mittalaitteen löytämisestä tekee erittäin haastavaksi väliaineen korkean lämpötilan, pienen putkikoon ja korroosio keston takia. Muitten laitteiden toimittajalta ei löytynyt suoraan sopivaa ratkaisua, joten yhtenä sopivana vaihtoehtona voisi toimia Krohne optisonic 4400 HT (Krohne n.d.). Määrät, paikat ja tarkemmat tiedot kirjattiin lopulliseen PI-kaavioon ja laitelistaan (liite 3; liite 5).

9.4 Näkölasin paluu putkistoon

Näkölasin valinnasta keskusteltiin laitetoimittajan kanssa puhelimitse 2.4.2025. Näkölasi täytyy teettää tilaustyönä sulasuolan korkean lämpötilan takia, eikä valmistajilta löydy suoraan sopivana olevaa ratkaisua. Näkölasien lasin materiaalit ovat yleensä soodaliasia, jonka maksilämpötilakesto on 150 °C tai borosilikaattilasia, jonka maksilämpötila kesto on 280 °C (Säätö Oy n.d.). Näkölasille tehtiin paikkavaraus lopulliseen PI-kaavioon X-002 (liite 3).

10 TYÖNTILAAJALLE TOIMITETTAVAT LISTAUKSET JA RAPORTIT

Työntilaaajalle luodaan ja toimitetaan listaukset ja raportit seuraavasti. PI-kaavio, josta selviävät laitteiden, putkiston ja instrumenttien paikat ja numerot (liite 3). Laitelistat, josta selviävät laitteiden, putkiston ja instrumenttien tiedot (liite 5). Lämmönsiirron laskelmat tehdään Excel tiedostona, josta selviävät lämmönsiirtoon liittyvät laskelmat eri putkikoilla (liite 4). Alustava kustannusarvio eri osa-alueet eriteltynä (liite 6). Ajo- ja käyttöohjeita testijärjestelmälle, joka sisältää myös automaation liityntätiedot (liite 7). Nämä edellä mainitut dokumentit ovat yleisesti käytettyjä dokumentteja, joita käytetään suunniteltaessa vastaavanlaisia kokonaisuuksia ja ovat tärkeitä, jotta testijärjestelmä voidaan rakentaa suunnitelman mukaisesti etenkin PI-kaavio. Laitelistauksiin kerätään yhteen tiedostoon kaikki oleellinen tieto testijärjestelmän laitteista ja mittauksista, josta niitä voidaan helposti käyttää esimerkiksi automaation luonnissa. Ajo- ja käyttöohje testijärjestelmälle toimii myös pohjana oppilaille tehtäviin ohjeisiin.

11 TURVALLISUUTEEN JA TESTIAJON LIITTYVÄT HUOMIOT

Ennen testijärjestelmän ajoa tulisi aina tarkistaa kaikki putkiston ja laitteiden liitokset ja kiinnitykset, jotta vältetään mahdollisilta vuodoilta. Testijärjestelmään ajattaessa on syytä ottaa huomioon, että suolan ollessa sulaa, sen lämpötila on yli 200 °C. Täten tulisi aina testiajon aikana käyttää tarvittavia suojarusteita mahdollisten vammojen estämiseksi, jos on tarvetta fyysisesti oleskella testijärjestelmän läheisyydessä. Suositeltavaa olisi, että testiajon aikana ei liikuttaisi testijärjestelmän läheisyydessä. Testijärjestelmän tulisi sijoittaa sellaiseen tilaan, missä mahdolliset sulasuolan roiskeet eivät aiheuta vahinkoa tai sytytä materiaaleja palamaan. Kiinteää suolaa käsiteltäessä tulee käyttää tarvittavia suojarusteita vähintään silmäsuojaimia ja hengityssuojainta mahdollisen pölyn takia.

Testiajon aikana, jos sulasuolan lämpötilaa pääsee laskemaan liian alaiseksi, se aiheuttaa sulasuolan viskositeetin kasvun, joka hidastaa virtausnopeutta, jos pumpun tehoa ei kasvateta. Tämä voi myös aiheuttaa sulasuolan kristallisoitumista putkien ja laitteiden seinämiin, joka alentaa esimerkiksi lämmönsiirtimen lämmönsiirto kykyä.

12 POHDINTAA

Itsessään järjestelmän suunnittelu ei ollut haastavaa, koska kyseessä on kohtalaisen yksinkertainen kokonaisuus. Järjestelmän luonnissa haastavin osuus oli ottaa huomioon sulasuolan tuomat rajoitteet. Tämä työ antoi hyviä oppeja jatkoa ajatellen tämän kaltaisten projektien osalta ja kasvatti ammattitaitoa. Nykyisillä ohjelmistoilla on helppo luoda esimerkiksi PI-kaavioita. Kuten tässä työssä käytetty Vertex G4PI prosessi- ja instrumenttikaavioiden suunnitteluohjelmisto, jolla luotiin PI-kaaviot. Työntilaaajan kanssa yhteistyössä valittu sulasuola, laaditut lähtöarvot ja rajat autoivat paljon luomaan järjestelmälle kokoluokan. Sulasuolaksi valikoitui Sqm's thermal-solar salt sen sopivien ominaisuuksien pohjalta. Putkiston kooksi valittiin DN15, joka antoi testijärjestelmälle sopivan koon koulun käytävissä oleviin tiloihin ja koulun putkiuunin kokoon nähden. Testijärjestelmäksi luotiin hyvin yksinkertainen kokonaisuus, jolla on helppo suorittaa tarvittavia testejä ja on sopiva opetusympäristöön. Alkuperäisten lähtöarvojen perusteella testijärjestelmälle laskettiin muut tarvittavat arvot, joita tarvitaan muiden laitteiden suunnittelussa ja laskentaan otettiin myös huomioon muita kokoja järjestelmälle, jotta työtilaaja voi tarvittaessa muuttaa testijärjestelmän kokoa. Instrumentoinnit valittiin yhteistyössä laitetoimittajien kanssa, joka autoi sopivien instrumentointien ja laitteiden valinnassa.

Työn haastavimmaksi osuudeksi osoittautui löytää sopivia laitteita ja instrumentointeja. Kohteen materiaali vaatimukset ja korkea lämpötila asettivat paljon rajoitteita laitteiden ja instrumentoinnin valinnassa. Tässä suurena apuna olivat laite ja instrumentointi toimittajat, jotka autoivat valinnoissa. Sulasuolan käyttö on vielä harvinaista energiantuotannossa, joka asettaa omat haasteensa tarvittavien tietojen ja lähde materiaalien löytämiselle. Tämä auttaa jatkossa hahmottamaan kuinka paljon tarvitsee panostaa resursseja työn teon eri vaiheissa.

Sulasuolan käyttö energiantuotannossa on vielä kasvava ala ja ei yleisesti tunnettu lämmönsiirtoaine. Jatkotutkimuksia on vielä hyvä tehdä niin järjestelmän suunnittelussa kuin käytännön käyttökemuksista. Kuten esimerkiksi instrumentoinnin osalta etenkin virtausmittauksen toteuttamisen osalta on vielä kehittämisen tarve.

LÄHTEET

Aplisens AT-3 n.d. Head-mounted temperature transmitter type AT-3. Esite.

<https://aplisens.com/pdf/produktu/AT-3.pdf>. Viitattu 3.4.2025.

Aplisens PCE-28 n.d. Pressure transmitter. Esite. <https://aplisens.com/pdf/produktu/PC-28.pdf>. Viitattu 3.4.2025.

Dekitek 2023. Miksi käyttää palloventtiiliä palloventtiilin sijaan? Verkkajulkaisu. <https://fi.deki-valve.com/info/why-use-a-globe-valve-instead-of-a-ball-valve--91073010.html>. Viitattu 24.4.2025.

Dynalene 2020. MS-2 Molten Salt Heat Transfer Fluid. Esite. <https://www.dynalene.com/wp-content/uploads/2020/08/Dynalene-MS-2-Tech-Data-Sheet-Rev1.pdf>. Viitattu 6.4.2025.

Euroopan unioni 2021. Komission suositus (EU) 2021/1700. Verkkajulkaisu. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H1700>. Viitattu 28.3.2025.

Etra 2025. SPIRAL TAL DN15 PN10-40. Verkkajulkaisu. <https://www.etra.fi/fi/spiral-tal-dn15-pn10-40-82507650359>. Viitattu 6.4.2025.

Kraemer, S. 2018. How CSP Works: Tower, Trough, Fresnel or Dish. SolarPACES. <https://www.solarpaces.org/how-csp-works/>. Viitattu 28.3.2025.

Krohne n.d. OPTISONIC 4400 HT Ultrasonic flowmeter for high temperature liquids. Verkkajulkaisu. <https://fi.krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters/ultrasonic-flowmeters/optisonic-4400-ht>. Viitattu 17.4.2025.

Manunen, Mikko 2025. Putkiuuni. Valokuva. 2.4.2025. Varkaus: Savonia-ammattikorkeakoulu.

Manunen, Mikko 2025. Putkiuunin tyypikilpi. Valokuva. 17.3.2025. Varkaus: Savonia-ammattikorkeakoulu.

Midgley, E. 2025. What are Molten Salt Reactors? Verkkajulkaisu. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-molten-salt-reactors>. Viitattu 28.3.2025.

Norrscope n.d. Tube furnaces. Esite. <https://www.norrscope.com/wp-content/uploads/2018/08/mtfN.pdf>. Viitattu 24.4.2025.

Oak Ridge National Laboratory 2024. Materials Assessment for FLiBe Fusion Blankets. Verkkajulkaisu. <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub219653.pdf>. Viitattu 6.4.2025.

Onninen 2025. Meijeriyhteet RST/HST. Verkkajulkaisu. https://www.onninen.fi/lampo-ja-vesi-seka-prosessiputkistot/meijeriyhteet-rst-hst/c/45?filter=ONNINEN_OF000783%3DAISI%20316%20L&sort=_score&order=DESC. Viitattu 6.4.2025

Protact PR series n.d. Pneumatic actuators PR series. Verkkajulkaisu. <https://www.protact-gmbh.de/en/products/actuators/pneumatic-actuators/series-pr>. Viitattu 17.4.2025.

PSK 3605. 2016. Prosessiteollisuuden virtaus- ja PI-kaavioiden symbolit. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

PSK 5201. 2013. Instrumenttiasennusten tyypipiirustukset. Yleiset periaatteet. 2. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.

SFS-ISO 14617-6. 2004. Kaavioissa käytettävät piirrosmerkit. Osa 6: Mittaus- ja ohjaustoiminnot. Helsinki: SFS Suomen Standardit ry.

SQM Europe NV n.d. Thermo-Solar Salts. Verkkojulkaisu. <https://sqmindustrialchemicals.com/thermo-solar-salts/>. Viitattu 6.4.2025.

Stainless Europe n.d. Verkkojulkaisu. <https://en.stainlesseurope.com/>. Viitattu 24.3.2025.

Säättö Oy n.d. Näkölasit putkistoon. Verkkojulkaisu. <https://saato.fi/tuotteet/nakolasit-putkistoon/>. Viitattu 2.4.2025.

Tekniikan kaavasto 2017. Tammertekniikka 17. painos. Tampere: AMK-Kustannus Oy.

U.S. Department of Energy n.d. Keskittävä aurinkovoimalla. Valokuva. <https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics>. Viitattu 4.4.2023.

Vinco Valces CFM-T n.d. CFM-T Series. Verkkojulkaisu. <https://vincovalves.com/products/cfm-t-series/>. Viitattu 17.4.2025.

Wagner, W. 1988. Lämmönsiirto. Würzburg. Suom. Ranta, O. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Waltz, E. & Chiu, Y. 2024. Why China Is Building a Thorium Molten-Salt Reactor. IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/chinas-thorium-molten-salt-reactor>. Viitattu 28.3.2025.

Wang, Y., Chen, W., Zhang, L., Zhao, X., Gao, Y., Danivahl, V. 20.3.2024. Sulasuola reaktorin konsepti. Valokuva. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3351220>. Viitattu 4.4.2025.

Yara 2025. Solar Power Molten Salt. <https://www.yara.com/industrial-nitrogen/solar-power-molten-salt/>. Viitattu 6.4.2025.

LIITE 1: SQM'S THERMAL-SOLAR SALT ESITE



SQM's
thermo-solar salts
delivering a cleaner future

SQM INTERNATIONAL N.V.

Worldwide thermo-solar salts business line, Houtdok-Noordkaai 25a 2030, Antwerpen, Belgium.
Tel: +32 (3) 203 9700 / solar_salts@sqm.com

sqm.com



SQM's thermo-solar salts

ECO-FRIENDLY ADVANTAGES



Non-toxic



100% natural nitrate
salts



Non-flammable



Highly refined,
low content of
impurities



High chemical stability



Virtually maintenance
free



High specific heat



Produced with much lower
CO₂ emissions and far less
environmental impact
compared to synthetically
produced salts

SQM's thermo-solar salts The proven & reliable Energy storage medium

SQM is the world's largest producer of
100% natural nitrates

SQM has a sales network which allows to cover
the needs of each specific market globally

SQM owns mines and installations that allow production
with the lowest possible CO₂ emissions

SQM delivers high quality products to its customers
that demand excellence on-time every time

SQM INTERNATIONAL N.V.

Worldwide thermo-solar salts business line, Houtdok-Noordkaai 25a 2030, Antwerpen, Belgium.
Tel: +32 (3) 203 9700 / solar_salts@sqm.com

sqm.com

SQM's sodium nitrate & potassium nitrate

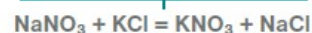
Annually, SQM produces around 1,5 million MT of sodium and potassium nitrate from Caliche Ore and Salar Brines, two natural resources found in northern Chile. Caliche is mined from surface deposits in the Atacama Desert; derived products including sodium nitrate and iodine. The salar brines are pumped from the underground in the Salar de Atacama (Atacama Salt Flat) after which they are transferred to large solar evaporation ponds to physically separate the desired elements. Main derived products are: lithium chloride, potassium chloride, magnesium chloride, boric acid and potassium sulphate. Nitrates are produced after the caliche mineral is crushed and exposed to a leaching process with water. Sodium nitrate is obtained from this leached solution by crystallization. Part of the obtained sodium nitrate goes through another stage of processing during which potassium chloride, from the Salar de Atacama is added. The mixture is then subject to other processes such as crystallization, refining and drying to yield potassium nitrate.



Caliche Ore
Iodine Nitrates



Salar Brines
Potassium Lithium



"Synthetic nitrate salts may increase Life-cycle GHG emissions by 52% compared to mined salts"(1)



SQM's potassium nitrate production process results in 20% to 40% less GHG emissions.

(1) John J. Burkhardt, III, Garvin A. Heath, and Craig S. Turchi. Life Cycle Assessment of a Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant and the Impacts of Key Design Alternatives, 2011.

Physical Properties

PHASE CHANGE PROPERTIES OF NITRATE SALTS

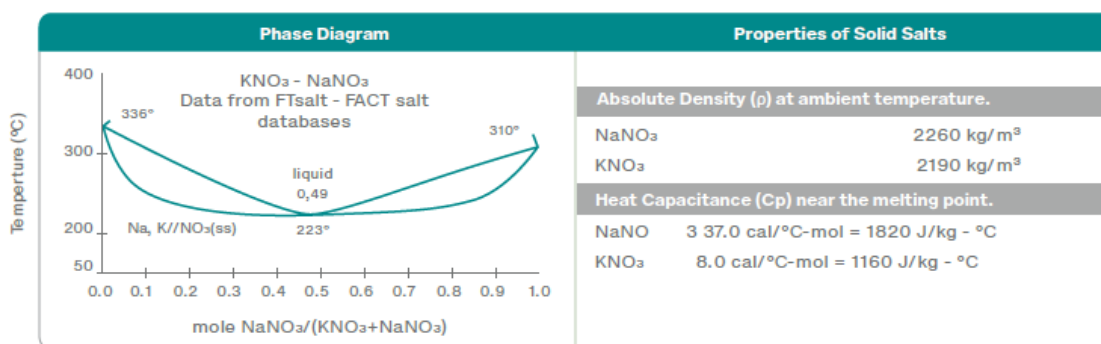
SQM's Molten thermo-solar salts can be used over a temperature range of 260 °C (500 °F) to approximately 621 °C (1150 °F). As temperature decreases, the salts start to crystallize at 238 °C (460 °F) and solidify at 221 °C (430 °F). Heat of fusion (based on the average of heat of fusion of each component): hsl = 161 kJ/kg. Change in density upon melting: $\Delta V/V_{\text{solid}} = 4.6\% \Rightarrow V_{\text{liquid}} = 1.046 V_{\text{solid}}$

Reference: A.V. Zavoico, SAND2001-2100 Solar Power Tower Design Basis Document - Courtesy of Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 - July 2001). For this specific application, Sodium Nitrate and Potassium Nitrate are mixed in 60%/40% by weight ratio. The mixture is stable in air and has a low vapour pressure.

Thermal and fluid properties of molten thermo-solar salts mixture (60% NaNO₃ + 40% KNO₃) as a function of temperature.

Physical properties in function of temperature (°F - °C)									
TEMP. (°F)	DENSITY (lb _m /ft ³)	SPECIFIC HEAT (btu/lb _m -f)	ABSOLUTE VISCOSITY (lb _m /hr-ft)	THERMAL CONDUCTIVITY (btu/hr-ft-f)	TEMP. (°C)	DENSITY (kg/m ³)	SPECIFIC HEAT (Joule/kg °C)	ABSOLUTE VISCOSITY (mPa-sec)	THERMAL CONDUCTIVITY (W/m-c)
500	120.10	0.356	10.506	0.285	260	1924.64	1488	4.343	0.492
550	118.98	0.358	8.607	0.288	288	1906.97	1492	3.558	0.498
600	117.87	0.359	7.085	0.291	316	1889.31	1497	2.929	0.503
650	116.76	0.360	5.894	0.294	343	1871.64	1502	2.436	0.508
700	115.65	0.361	4.987	0.297	371	1853.97	1507	2.062	0.514
750	114.54	0.362	4.320	0.300	399	1836.31	1512	1.786	0.519
800	113.43	0.363	3.845	0.303	427	1818.64	1516	1.589	0.524
850	112.32	0.364	3.518	0.307	454	1800.97	1521	1.454	0.529
900	111.21	0.366	3.291	0.310	482	1783.31	1526	1.361	0.535
950	110.10	0.367	3.121	0.313	510	1765.64	1531	1.290	0.540
1000	108.99	0.368	2.960	0.316	538	1747.97	1535	1.223	0.545
1050	107.88	0.369	2.762	0.319	566	1730.31	1540	1.142	0.550
1100	106.77	0.370	2.483	0.322	593	1712.64	1545	1.026	0.556

Properties of fluid solar salts in function of temperature between 300°C (570 °F) and 600°C (1110 °F)	
Density	Thermal Conductivity
ρ (lbm/ft ³) = 131.2 - 0.02221 x T (°F) ρ (kg/m ³) = 2090 - 0.636 x T (°C)	k (Btu/hr-ft-°F) = 0.253208 + 6.26984 x 10 ⁻⁵ x T (°F) k (W/m-°C) = 0.443 + 1.9 x 10 ⁻⁴ x T (°C)
C_p (Btu/lbm-F) = 0.345 + (2.28 x 10 ⁻⁵) x T (°F) C_p (J/kg-°C) = 1443 + 0.172 x T (°C)	
Absolute Viscosity	
μ (lbm/ft-hr) = 60.28440 - 0.17236 x T (°F) + (1.76176 x 10 ⁻⁴) x (T (°F)) ² - (6.11408 x 10 ⁻⁸) x (T (°F)) ³ μ (mPa-sec) = 22.714 - 0.120 x T (°C) + 2.281 x 10 ⁻⁴ x (T (°C)) ² - 1.474 x 10 ⁻⁷ x (T (°C)) ³	



Specifications

SQM offers to the CSP industry high quality sodium nitrate and potassium nitrate grades to match the specific requirements of each CSP power plant developer.

Chemical Specifications Overview					
PARAMETERS		UNITS		THERMO-SOLAR GRADE PRODUCTS	
				NaNO ₃ , Refined	KNO ₃ , Refined
Purity		%	min	99.5	99.6
Chlorine	Cl	%	max	0.08	0.10
			typical	0.05	0.05
Perchlorate	ClO ₄	%	max	0.035	0.01
Magnesium	Mg	%	max	0.02	0.01
Nitrite	NO ₂	%	max	0.02	0.02
Sulphate	SO ₄	%	max	0.10	0.05
Carbonate	CO ₃	%	max	0.10	0.02
Hydroxil	OH	%	max	0.05	0.05
Moisture (2)	H ₂ O	%	max	0.1	0.1

(1) The product does not contain other relevant sources of halogen compounds (iodide, bromide, iodate, bromate or any other).
 (2) Moisture measured at SQM production site. Some absorption of moisture may occur during transportation.

Particle size guaranteed: 2mm. Insoluble particles between 0.85 mm and 2 mm represent typically less than 0.05% of the product. Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008 and the Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS).

Potassium nitrate: Oxidising solid, category 3.

Sodium nitrate: Oxidising solid, category 3. Irritating to eyes, category 2.

Experience about CORROSION

The level of corrosion of SQM's thermo-solar salts has been proven to be acceptable since the Nineties. In more recent measurements, Sandia National Laboratories (USA) has concluded that at 600°C bulk molten salt temperature, the average corrosion rate ranged less than 16,5 microns per year for 13 different alloys after 3000

hours of test with only one alloy exceeding 25 microns. Most industrial applications would label that as excellent corrosion performance.

(ref. SAND 2013-2526, March 2013).

Results of the study conducted by Sandia National Laboratories (USA)			
ALLOY	ALLOY DENSITY [g/cm ³]	DESCALED LOSS [mg/cm ²]	METAL LOSS [µm/year]
321SS	7.94	4.59	15.9
347SS	8.03	2.59	10.4
253MA	7.8	10.31	38.6
HA556	8.23	5.9	20.8
RA330	8.22	4.8	16.2
S35140	7.96	2.4	8.8
332Mo	8.13	3.4	12.2
HR120	8.07	4.97	18
HR224	8 ^a	2.27	8.3
HA230	8.97	7.25	23.6
HA214	8.05	1.56	5.7
In625	8.44	4.86	16.8
HA242	9.05	5.88	18.98

SQM's thermo-solar salts **PROVIDE CLEAN ENERGY TO EMBRACE AN ECO-FRIENDLY FUTURE**

Most renewable energy technologies such as wind and PV suffer from a discontinuous energy supply and an unpredictable output due to altering weather conditions and/or energy demands. Concentrated solar power (CSP) plants, equipped with a Molten Salts Storage System, store excess heat and stay operational also during evening hours and cloudy days, which significantly increases their electricity output. The generated electricity from thermal storage is completely dispatchable: its power can be connected to the electrical grid at any time.

The economic value OF THERMAL ENERGY STORAGE:

NREL (National Renewable Energy Laboratory) conducted a study that clearly demonstrates that it was economically equivalent to remunerate 5 US cents/kWh to a new PV plant and 10 US cents/kWh to a CSP plant with storage.

The result of the study incorporates these two values related to thermal storage:

Operational value

Represents the avoided costs of conventional generation at their respective dispatching along with related ancillary service costs, such as spinning reserve, etc. Savings on emission costs are also taken into account.

Capacity value

Reflects the ability to avoid the costs of building new conventional generation in response to growing energy demands or plants retirements

And beyond CSP...

Thermal storage can be applied in other cases wherever thermal energy is used and not only in CSP plants. It can be implemented in industrial processes and even deployed for grid applications where the excess of electricity is converted to heat and stored in a solar salts thermal storage unit.

Thermal storage based on molten nitrate salts is stable for at least 30 years while the lifetime for batteries is shorter and rather uncertain.



An environmentally friendly solution from SQM that optimizes the efficiency of your industry.

100 MW Xina Solar Plant. Photo courtesy of Abengoa S.A.



NOOR Ouarzazate solar plant.
Photo courtesy of Acwa Power Morocco.



SQM's thermo-solar salts:
**The proven & reliable
energy storage medium**

An eco-friendly solution to your CSP plant

CSP* CONCENTRATED SOLAR POWER

LIITE 2: ALUSTAVA PI-KAAVIO SULASUOLA TESTIJÄRJESTELMÄ

LIITE 3: LOPULLINEN PI-KAAVIO SULASUOLA TESTIJÄRJESTELMÄ

LIITE 4: LÄMMÖNSIIRTO LASKELMAT EXCEL

LIITE 5: LAITELISTAT EXCEL

LIITE 6: ALUSTAVA KUSTANNUSARVIO

LIITE 7: AJO- JA KÄYTTÖOHJEITA TESTIJÄRJESTELMÄLLE