

Saara Lippo

**NESTEKAASUN JA RASKAAN POLTTOÖLJYN KORVAAMINEN LNG:LLÄ
KEMIN KAIVOKSELLA**

**NESTEKAASUN JA RASKAAN POLTTOÖLJYN KORVAAMINEN LNG:LLÄ
KEMIN KAIVOKSELLA**

Saara Lippo
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Energiatekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t): Saara Lippo

Opinnäytetyön nimi: Nestekaasun ja raskaan polttoöljyn korvaaminen LNG:llä Kemin kaivoksella

Työn ohjaaja: Jukka Ylikunnari

Työn valmistumislukukausi- ja vuosi: kevät 2016

Sivumäärä: 44 + 6 liitettä

Outokummun Kemin kaivoksella maanalaiseen kaivokseen puhallettavaa raitisilmaa lämmitetään talvella nestekaasulla. Lisäksi kaivoksen alueella on kaksi raskaan polttoöljyn kattilaa, joilla tuotetaan kaukolämpöä sekä höyryä kaivoksen käyttöön. Tornion Röyttään valmistuu vuonna 2018 nestemäisen maakaasun eli LNG:n tuontiterminaali, jonka osakkaana Outokumpu Oyj on. Tarkoituksena oli tehdä selvitys nestekaasun ja raskaan polttoöljyn korvaamisesta LNG:llä, sekä arvioida polttoaineen vaihdon kannattavuutta.

Työssä selvitettiin nykyisten järjestelmien soveltuvuus LNG:lle sekä tarvittavat laitemuutokset. Lisäksi kaivokselle kehiteltiin neljä erilaista vaihtoehtoa LNG-järjestelmien toteuttamisesta. Tarvittavista järjestelmistä ja laitemuutoksista pyydettiin tarjoukset, minkä jälkeen laskettiin investointikustannukset jokaiselle vaihtoehdolle. Lisäksi vaihtoehdoille laskettiin vuosisäästöt halvempaan polttoaineeseen vaihdettaessa. Kustannuksista ja säästöstä laskettiin myös suora takaisinmaksuaika.

LNG:tä käyttämällä säästettäisiin selvästi polttoainekustannuksissa vuosittain. Järjestelmien investointikustannukset ovat kuitenkin sen verran suuret, että jokaisen vaihtoehdon takaisinmaksuaika on kymmenestä vuodesta ylöspäin. Mahdolliset investoinnit eivät kuitenkaan ole vielä ajankohtaisia, sillä terminaali valmistuu vasta vuonna 2018. Kaivos pystyy opinnäytetyötä hyödyntäen arvioimaan nestekaasun ja raskaan polttoöljyn korvaamisen kannattavuutta tarkemmin.

Asiasanat: LNG, nestekaasu, raitisilma, kaivos, kestävä kehitys

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
SISÄLLYS.....	4
1 JOHDANTO.....	6
2 OUTOKUMPU.....	7
2.1 Toimialueet.....	7
2.2 Outokumpu Suomessa.....	7
3 LNG.....	9
3.1 LNG:n mahdollisuudet.....	9
3.2 Polttoaineiden ominaisuudet.....	10
4 NYKYISET JÄRJESTELMÄT.....	12
4.1 Raitisilman lämmitysjärjestelmä.....	12
4.1.1 Säiliö.....	12
4.1.2 Höyrystimet.....	14
4.1.3 Polttimet.....	15
4.2 POR-kattilat.....	15
4.3 Polttoaineiden kulutukset.....	16
4.3.1 Nestekaasu.....	16
4.3.2 Raskas polttoöljy.....	16
5 JÄRJESTELMIEN MUUNTAMINEN LNG:LLE.....	18
5.1 Sijoitusvaihtoehdot laitteistolle.....	18
5.2 Laitteisto.....	19
5.2.1 Säiliö.....	20
5.2.2 Höyrystimet.....	21
5.2.3 Putkisto.....	24
5.2.4 Polttimet.....	26
5.2.5 Paineenalennuslaitteisto.....	26
5.3 POR-kattilat.....	26
5.4 Operointi.....	27
6 TOTEUTUSEHDOTUKSET JA NIIDEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET.....	28
6.1 Toteutusehdotus 1.....	28
6.2 Toteutusehdotus 2.....	32

6.3	Toteutusehdotus 3.....	34
6.4	Toteutusehdotus 4.....	36
7	KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI.....	39
8	LOPPUSANAT.....	41
	LÄHTEET.....	42
	LIITTEET	44

1 JOHDANTO

Outokummun Kemin kaivoksella lämmitetään maanalaiseen kaivokseen puhallettavaa raitisilmaa nestekaasulla. Nestekaasujärjestelmiä on kaksi, joista toinen on ollut käytössä jo 2000-luvun alusta lähtien ja toinen on valmistunut vuonna 2015. Nestekaasujärjestelmät on rakennettu raitisilmakanavien yhteyteen ja lämmitys on käytössä ulkolämpötilan mukaan arviolta lokakuusta huhtikuuhun. Kaivoksella on myös kaksi raskaan polttoöljyn kattilaa, joilla tuotetaan höyryä ja kaukolämpöä.

Tornioon Röyttään on rakenteilla LNG-tuontiterminaali, jonka on tarkoitus valmistua vuonna 2018. LNG on ympäristöystävällinen ja energiatehokas polttoaine, jota tulevaisuudessa olisi mahdollista saada läheisestä terminaalista, jossa Outokumpu Oyj on osakkaana. Lisäksi LNG on hinnaltaan edullisempaa kuin raskas polttoöljy tai nestekaasu keskimäärin.

Opinnäytetyössä on tarkoitus tehdä kaivokselle selvitys polttoaineiden LNG:ksi muuttamisen kannattavuudesta. Nestekaasujärjestelmiin ollaan kaivoksella tyytyväisiä, mutta mahdollisuus saada ”omasta” terminaalista polttoainetta kiinnostaa. Raskas polttoöljy eli POR vaihdettaisiin mielellään ympäristöystävällisempään ja halvempaan polttoaineeseen, minkä vuoksi kattilat on otettu mukaan opinnäytetyöhön.

Opinnäytetyössä selvitetään tarvittavat muutokset nestekaasujärjestelmille ja POR-kattiloille, jotta ne sopisivat LNG:llä käytettäviksi. Lisäksi annetaan muutamia toteuttamisvaihtoehtoja laitteistojen sijoittamisesta sekä eri höyrystintyypeistä. Investoinneista annetaan kustannusarviot sekä eri polttoaineille ja höyrystinvalinnoille lasketaan vuosisäästöt. Lopuksi jokaiselle vaihtoehdolle lasketaan takaisinmaksuajat. Opinnäytetyössä pohditaan lopuksi, mikä vaihtoehdoista olisi kannattavin.

2 OUTOKUMPU

Outokumpu on maailman johtavin ruostumattoman teräksen valmistaja. Vuonna 2014 Outokummulla oli ruostumattoman teräksen toimituksia kaikkiaan 2,6 miljoonaa tonnia ja liikevaihto oli 6 844 miljoonaa euroa. Sillä on tuotantolaitoksia Suomessa, Saksassa, Ruotsissa, Isossa-Britanniassa, Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Meksikossa. Outokummun palveluksessa on yli 30 maassa yli 12 000 henkilöä, joista noin 2 400 työskentelee Suomessa. (1 -> Yritys.)

2.1 Toimialueet

Outokumpu toimii ympäri maailmaa ja se on jaettu viiteen liiketoiminta-alueeseen. Coil EMEA:n tuotanto ja myynti ovat keskittyneet EMEA-alueelle eli Eurooppaan, Afrikkaan ja Lähi-Itään. Coil Americas toimii Amerikoiden alueella ja Coil APAC vastaavasti Aasian ja Tyynenmeren alueella. Lisäksi yhtenä toiminta-alueena on Long Products, joka on keskittynyt pitkien tuotteiden, kuten tankojen, betoniteräksien ja hitsattujen putkien tuotantoon. Tuotantolaitokset ovat Ruotsissa, Isossa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa ja tuotteita myydään ympäri maailmaa. Viimeinen toiminta-alue on Quarto Plates eli kvarttolevyt. Niitä valmistetaan Ruotsissa ja Yhdysvalloissa ja myydään ympäri maailmaa. (1, linkit Yritys -> Organisaatio.)

2.2 Outokumpu Suomessa

Outokumpu on perustettu Suomessa 1930-luvulla ja nykyisin sillä on Suomessa ruostumattoman teräksen tuotantolaitos Torniossa ja kromikaivos Kemissä. Pääkonttori sijaitsee Espoossa. Tornion tehtaiden henkilöstömäärä on yli 2000 ja tehtaat on yksi maailman suurimmista ruostumattoman teräksen tuotantolaitoksista.

Teräs saadaan ruostumattomaksi kromin avulla. Kromirikastetta saadaan Kemin kaivoksesta, jonka koko kromimalmin tuotanto on maanalaista. Kemin kaivos on ainoa kromikaivos EU-alueella, ja sen koko kromimalmin tuotanto on maanalaista. Arvioidut malmivarat ovat yhteensä noin 50,1 miljoonaa tonnia ja vuosittain malmia louhitaan noin 2,4 miljoonaa tonnia. Vuonna 1959 paikallinen sukeltaja Martti Matilainen löysi kromiittiesiintymän, minkä jälkeen kaivoksen tuotanto

aloitettiin vuonna 1968. (1, linkit Yritys -> Outokumpu Suomessa -> Tuotantoprosessi Torniossa ja Kemin kaivoksella; 2.)

3 LNG

LNG (Liquified natural gas) on maakaasua nestemäisessä ja puhdistetussa muodossa. Se koostuu lähinnä metaanista (> 98 %), mutta lisäksi se sisältää mm. typpiä, etaania, propaania ja butaania pieninä pitoisuuksina. Metaanin kiehumispiste on $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, jonka alle jäädyttämällä maakaasu voidaan nesteyttää. Kaasumaisen metaanin tiheys on $0,72\text{ kg/m}^3$ ja nestemäisen 421 kg/m^3 , eli nestemäisenä sen tilavuus on noin 1/600 kaasun tilavuudesta normaaliolosuhteissa. Tällä on suuri merkitys maakaasun kuljetuksessa ja varastoinnissa, sillä nestemäisessä muodossa saadaan kuljetettua enemmän energiaa pienemmässä tilavuudessa. Toisin kuin kaasuna, nestemäisenä toimitettava maakaasu on hajustamatonta. (3, s. 20.)

LNG on väritön, hajuton, mauton sekä myrkytön neste. Se ei sisällä raskasmetalleja tai rikkiä, eikä sen käytöstä synny haitallisia pienhiukkaspäästöjä. LNG ei myöskään aiheuta korroosiota eikä ole syövyttävää. (4, linkit Kaasutietoutta -> nesteytetty maakaasu LNG.)

LNG:n hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät nestekaasuun ja muihin yleisimpiin energiamuotoihin verrattuna. Esimerkiksi raskaaseen polttoöljyyn verrattuna LNG:n hiilidioksidipäästöt ovat noin 25 % pienemmät. (5, linkit Ympäristö -> Nestekaasu pienentää ympäristökustannuksia -> Nestekaasu ja hiilidioksidi.)

3.1 LNG:n mahdollisuudet

LNG on energiatehokas ja puhdas polttoainevaihtoehto kaasuverkoston ulkopuoliselle teollisuudelle, raskaalle maantielikenteelle sekä meriliikenteelle. Sen avulla voidaan korvata öljypohjaisia fossiilisia polttoaineita teollisuudessa, energiantuotannossa sekä meriliikenteessä. LNG sopii myös maa- ja biokaasun varapolttoaineeksi. Itämeren rannikolle onkin suunnitteilla useita LNG-terminaaleja. (4, linkit Kaasutietoutta -> Nesteytetty maakaasu LNG.)

Vuonna 2018 Kemin kaivoksesta noin 50 km:n päähän valmistuu LNG-tuontiterminaali, jota Manga LNG Oy:n tytäryhtiö Manga Terminal Oy rakentaa tällä hetkellä Tornion Röyttään. Osakkaina Manga LNG Oy:ssa ovat Outokumpu Oyj, SSAB Oy, Skangass Oy ja EPV Energia Oy. Terminaalin koko tulee olemaan $50\ 000\text{ m}^3$ ja sen ympärille luodaan tehokas logistiikkaketju. Läheltä saa-

tavaa LNG:tä olisi siis helppo kuljettaa Kemin kaivokselle, mikäli nestekaasu ja raskas polttoöljy korvattaisiin sillä. (6.)

Viime vuosina LNG:n hinta on pysynyt vakaampana ja sen hintakehitys on ollut maltillisempaa kuin raskaan polttoöljyn. LNG on näin ollen halvempi polttoaineratkaisu kuin raskas polttoöljy ja se on myös keskimääräistä nestekaasun hintaa halvempi. Kesällä 2015 nestekaasun hinta oli kuitenkin erittäin alhainen, jolloin se oli selvästi halvempaa, kuin mitä LNG olisi ollut. (4; 7.)

Nestekaasu muuttui verolliseksi polttoaineeksi 1.1.2016 alkaen. Tämä tarkoittaa sitä, että moottori- ja lämmityskäyttöön käytettävästä nestekaasusta on maksettava nestekaasun energiasisältöön perustuva energiasisältövero sekä lisäksi hiilidioksidin ominaispäästöön perustuva hiilidioksidivero. Verottomana nestekaasua voi edelleen käyttää jatkossa teollisessa tuotannossa raaka- tai apuaineena sekä välittömästi ensikäytössä tavaran valmistuksessa. Verolliseksi polttoaineeksi muuttuminen nostaa nestekaasun hintaa huomattavasti, sillä kilogrammalle nestekaasua veroa kertyisi kaiken kaikkiaan 24,93 senttiä eli 19,386 €/MWh. Myös maakaasu on verollista ja vuonna 2016 siitä maksetaan veroa 17,424 €/MWh. (8; 9.)

3.2 Polttoaineiden ominaisuudet

LNG:llä olisi tarkoitus korvata kaivoksella sekä nestekaasu että raskas polttoöljy. Taulukkoon 1 on koottu LNG:n, nestekaasun (LPG) ja raskaan polttoöljyn (POR) ominaisuuksia. Opinnäytetyössä myöhemmin olevissa laskuissa on käytetty taulukossa ilmoitettuja tiheyksiä ja tehollisia lämpöarvoja. Nestemäisen ja kaasumaisen maakaasun tiheyksien suhde on lähes 1/600 ja nestekaasulla vastaavasti noin 1/250. Näin ollen saman energiamäärän tuottamiseksi kaasumaisen LNG:n tilavuus on huomattavasti LPG:tä suurempi. Tehollisissa lämpöarvoissa kilogrammaa kohden ei juuri ole merkittäviä eroja LNG:n, LPG:n ja POR:n kesken. Kuitenkin normikuutiosta saatavissa energioissa on selvästi eroa LNG:n ja LPG:n välillä, sillä nestekaasulla kyseiset arvot (MJ/m³n ja kWh/m³n) ovat maakaasun arvoja suuremmat. (10, s. 7–9.)

TAULUKKO 1. LNG:n, LPG:n ja POR:n ominaisuuksia (10, s. 7–9; 11)

	LNG	LPG	POR
Tiheys, kaasu	0,72 kg/m ³	2,02 kg/m ³	
Tiheys, neste	421 kg/m ³	510 kg/m ³	0,96 kg/dm ³
Tehollinen lämpöarvo	36,00 MJ/m ³ n	93,60 MJ/m ³ n	
	50,00 MJ/kg	46,30 MJ/kg	40,6 MJ/kg
	13,90 kWh/kg	12,86 kWh/kg	11,3 kWh/kg
	10,00 kWh/m ³ n	26,00 kWh/m ³ n	
Kiehumispiste (atm)	– 161,5 °C	– 42,1 °C	150–750 °C
Syttymislämpötila	600-650 °C	500 °C	>400 °C
Syttymisalue	5–15 til-%	2,1–9,3 til-%	1–6 til-%

Taulukosta 1 nähdään, että maakaasun syttymislämpötila on nestekaasua korkeampi, sillä maakaasulla se on noin 600–650 °C ja nestekaasulla noin 500 °C. Korkean syttymislämpötilan lisäksi molemmilla kaasuilla on kapeat syttymisalueet. Maakaasua pitää olla ilmassa vähintään 5 til-%, mutta alle 15 til-%, jotta se sytty palamaan ilman ollessa +20 °C. Nestekaasulla vastaavat syttymisrajat ovat vähintään 2,1 til-%, mutta alle 9,3 til-%. Maakaasu voidaan tehdä syttymiskelvottomaksi lisäämällä ilmaan inerttiä kaasua, hiilidioksidia tai typpeä. Esimerkiksi typen lisääminen ilmaan niin, että sitä on 37 til-%, estää metaanin syttymisen. (10, s. 12–13.)

Raskas polttoöljy on kuumennettuna musta, juokseva neste ja jäähtyessään se jähmettyy jäykkäliikkeiseksi. Se kuljetetaan ja varastoidaan yleensä lämmitettynä. POR:n syttymislämpötila on hieman alhaisempi kuin molempien kaasujen, mutta kiehumispiste on olomuodon vuoksi korkeampi. Sen syttymisalue on pienempi kuin kaasumaisilla polttoaineilla, ja jo 1 til-% ilmassa riittää syttymiseen. (11.)

Nestekaasu on 1,5 kertaa ilmaa raskaampaa, mikä tarkoittaa, että vuodon sattuessa kaasu jää syttymisalttiiksi ilmaan. LNG:n höyry taas on ilmaa kevyempää, joten vuotava LNG haihtuu, nousee ilmaan ja häviää. Näin ollen sen aiheuttama palovaara on epätodennäköisempi kuin esimerkiksi nestekaasun. Haihtuessaan LNG ei myöskään pääse saastuttamaan maaperää tai vettä. (12, linkit Tuotteet -> Nestekaasu -> Nestekaasutietoa; 12, linkit Tuotteet -> Nesteytetty maakaasu (LNG) -> AGA LNG esite.)

4 NYKYISET JÄRJESTELMÄT

LNG:llä korvattavia kohteita on kaivosalueella kolme. Kaksi näistä on nestekaasujärjestelmiä, joilla lämmitetään kaivokseen puhallettavaa raitisilmaa nestekaasulla. Lisäksi kolmantena kohteena on kaksi raskaan polttoöljyn kattilaa, joilla tuotetaan kaukolämpöä ja höyryä.

4.1 Raitisilman lämmitysjärjestelmä

Maanalaiseen kaivokseen puhallettavaa raitisilmaa joudutaan lämmittämään sään kylmetessä, yleensä lokakuusta huhtikuuhun. Nestekaasulla toimivia lämmitysjärjestelmiä on kaivosalueella kaksi: 2000-luvun alussa rakennetussa IVN2-kanavassa sekä 2015 valmistuneessa IVN10-kanavassa. Molemmissa kanavissa on kaksi aksiaalipuhallinta, joiden yhteiskapasiteetti on noin 180 m³/s raitisilmaa kaivokseen.

Vanhempi raitisilman lämmitysjärjestelmä koostuu yksinkertaistettuna nestekaasusäiliöstä, höyrystinkesuksesta ja kahdesta 4 MW:n polttimesta. Seuraavassa on kuvattuna vanhemman raitisilmajärjestelmän toimintaperiaate. Uudempi järjestelmä on pääpiirteittäin samanlainen, mutta esimerkiksi putkipituudet saattavat poiketa vanhemmasta. (13.)

4.1.1 Säiliö

Nestekaasu varastoidaan nestemäisenä 99 m³:n (49,5 t) kokoisessa maanalaisessa säiliössä Kemin kaivoksen alueella. Säiliö on peitetty vähintään 0,6 metrin paksuisella maakerroksella. Säiliön paine on riippuvainen ainoastaan nestekaasun lämpötilasta. Normaaleissa olosuhteissa säiliön paine on kesällä maksimissaan noin 6 bar. Säiliön minimi suunnittelulämpötila on -40 °C ja maksimi +40 °C. Näin ollen säiliössä olevan nestekaasun sallitut minimi- ja maksimilämpötilat ovat samat. (13.)

Kaavoissa 1–4 on laskettu yhden täyden nestekaasusäiliön riittävyys. Kaavassa 1 lasketaan ensiksi säiliöön mahtuvan nestemäisen polttoaineen tilavuus kaasuna.

$$V_{kaasu} = V_{säiliö} * x * \frac{\rho_{neste}}{\rho_{kaasu}}$$

KAAVA 1

V_{kaasu} = Kaasun tilavuus (m³)

$V_{säiliö}$ = Säiliön tilavuus (m³)

x = Säiliön täyttöaste

ρ_{neste} = Nestemäisen polttoaineen tiheys (kg/m³)

ρ_{kaasu} = Kaasumaisen polttoaineen tiheys (kg/m³)

Kaavaan 1 sijoittamalla 99 m³:n säiliöstä höyrystettävän nestekaasun tilavuudeksi saadaan

$$99m^3 * 0,89 * \frac{510 \text{ kg/m}^3}{2,02 \text{ kg/m}^3} = 22\,245,6 \text{ m}^3$$

Seuraavaksi lasketaan polttoaineen massavirta, jolla haluttu teho saavutetaan. Massavirta lasketaan kaavalla 2.

$$q_m = \frac{\Phi}{\text{tehol.lämpöarvo}}$$

KAAVA 2

q_m = Kaasun massavirta (kg/s)

Φ = Tarvittava poltinteho (MW = MJ/s)

tehol. lämpöarvo = Polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

Kaavan 2 sijoittamalla massavirraksi täydellä 8 MW:n poltinteholla ajettaessa saadaan

$$\frac{8 \text{ MJ/s}}{46,3 \text{ MJ/kg}} = 0,172886 \text{ kg/s} = 622,3896 \text{ kg/h}$$

Massavirta muunnetaan kaavan 3 avulla tilavuusvirraksi.

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_{kaasu}}$$

KAAVA 3

q_v = Kaasun tilavuusvirta (m³/s)

q_m = Kaasun massavirta (kg/s)

ρ_{kaasu} = Kaasumaisen polttoaineen tiheys (kg/m³)

Kaavaan 3 sijoittamalla nestekaasun massavirta ja kaasun tiheys saadaan tilavuusvirraksi

$$\frac{0,172886 \text{ kg/s}}{2,02 \text{ kg/m}^3} = 0,085538 \text{ m}^3/\text{s} = 307,9368 \text{ m}^3/\text{h}$$

Lopuksi kun kaasun tilavuus jaetaan tilavuusvirralla, joka on muunnettu tuntia kohden kertomalla 3600:lla, saadaan tuntimääräinen aika yhden säiliöllisen riittävyydelle (kaava 4).

$$t = \frac{V_{kaasu}}{q_v * 3600} \quad \text{KAAVA 4}$$

t = Nestekaasun riittävyys (h)

V_{kaasu} = Kaasun tilavuus (m^3)

q_v = Kaasun tilavuusvirta (m^3/s)

Kaavaan 4 sijoitettuna saadaan nestekaasusäiliön riittävyydeksi

$$\frac{22245,6 \text{ m}^3}{0,085538 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 3600} = 72,2 \text{ h} = 3 \text{ vrk}$$

Näin ollen täysi nestekaasusäiliö kestää nestekaasun maksimikulutuksella 3 vuorokautta. Täytyy huomioida, ettei säiliötä päästetä koskaan tyhjäksi asti, joten täydellä teholla ajettaessa säiliötä olisi täytettävä useammin.

4.1.2 Höyrystimet

Nestekaasusäiliöstä nestekaasu johdetaan maahan upotetulla ruostumattomasta teräksestä valmistetulla DN25-putkella höyrystinkeskukselle noin 100 metrin päähän. Nestemäisen nestekaasun lämpötila on $-40 \dots 40^\circ\text{C}$ höyrystinkeskukselle tullessa ja paine 2,5–18 bar. Höyrystinkeskuksessa on kolme läpivirtausperiaatteella toimivaa höyrystintä, joiden kunkin höyrystysteho on 300 kg/h. Höyrystimien lämmönvaihdin on upotettuna lämmönsiirtonesteeseen, jossa on 40 % etyleeniglykolia ja loput vettä. Höyrystimissä nestekaasun höyrystys tapahtuu sähköllä. Kaivoksella ei ole omaa seuranta höyrystimien kuluttamalle sähkölle, mutta yhden höyrystinkeskuksen teho

on 6 x 24 kW, mitä kautta voidaan arvioida höyrystimien vuosittain käyttämän sähkön kustannusta (kaava 5). Kaavan 2 mukaisesti laskettuna 8 MW:n tehoa varten tarvittava massavirta on 622,4 kg/h, jolloin höyrystimä käytetään maksimissaan 70 %:n teholla. Tämän vuoksi kaavassa 5 tulos kerrotaan lopuksi 0,7:llä.

$$\epsilon_{\text{sähkö}} = \Phi * t * x \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 0,7$$

KAAVA 5

$\epsilon_{\text{sähkö}}$ = Höyrystimien käyttämän sähkön vuosikustannus (€)

Φ = Höyrystimien teho (MW)

t = höyrystimien käyntiaika vuodessa (h)

$x \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ = Sähkön hinta (€ / MWh)

Höyrystimisen jälkeen nestekaasun lämpötila on +30...+50 °C. Kaasun paine alennetaan höyrystimikeskukseen sijoitetulla neljälinjaisella paineenalennuslaitteistolla noin 1–1,5 bar:n siirtopaineeseen. (13.)

4.1.3 Polttimet

Höyrystimisen jälkeen nestekaasu johdetaan DN100-putkella noin 40 metriä alemmalla tasolla olevalle poltinrakennukselle. Rakennuksessa on kaksi Eclipsen 4 MW:n tehoista suoratoimista kanavapoltinta. Polttimien liekki palaa suoraan kaivokseen puhallettavassa ilmavirrassa. Kaivokseen puhallettava raitisilman lämpötila on noin +5...+7 °C. (13.)

4.2 POR-kattilat

Kaivoksen alueella on kaksi 1,5 MW:n raskaan polttoöljyn kattilaa. Toinen kattiloista on kuuma-vesikattila, jolla tuotetaan kaukolämpöä ja toinen höyrykattila, jolla tuotetaan höyryä malmin rikastusprosessiin. Kattiloissa on käytössä Oilonin valmistamat raskaan polttoöljyn polttimet. Toisessa kattilassa polttimena on Oilonin RP-140 H -poltin, jonka mahdollinen poltinteho on 680–2040 kW ja öljyn massavirta 60–180 kg/h. H-kirjain mallin perässä tarkoittaa, että polttimen tehonsäätö on 2-portainen. Poltin on tällöin varustettu ilmapellin säätömootorilla, jonka tehojen välinen ajoaika on viisi sekuntia. Riippuen kuorman suuruudesta poltin toimii automaattisesti 1- tai 2-teholla.

Toisessa kattilassa polttimen malli on RP-200 M, jolloin sen mahdollinen poltinteho on hieman suurempi ja öljyn massavirta voi olla 65–210 kg/h. Tässä polttimessa on moduloiva tehonsäätö, jolloin poltin toimii koko tehoalueella kuorman mukaan. (14.)

4.3 Polttoaineiden kulutukset

Kaivoksella nestekaasua käytetään ainoastaan raitisilman lämmittämiseen. Raskaan polttoöljyn ainoat kohteet ovat kaivoksen kaksi 1,5 MW:n POR-kattilaa.

4.3.1 Nestekaasu

Nestekaasujärjestelmää ylläpitää Neste, joka tuo nestekaasua kaivokselle Tornion nestekaasuterminaalista. Ensimmäisen IVN-kanavan rakennussuunnitelmassa propaanin vuosikulutukseksi on arvioitu 500 tonnia. Vuosina 2010–2012 vuosikulutus on ollut reilusti arvioitua suurempi, mutta vuosina 2013 ja 2014 kulutus on laskenut arvioituun määrään ja jopa sen alle. Syynä reiluun kulutuksen vähenemiseen on todennäköisesti ollut leudot talvet, minkä vuoksi raitisilman lämmitykseen ei ole kulunut yhtä paljon energiaa kuin kylmempinä talvina. Keskimäärin vuosina 2010–2014 kulutus on ollut 640 tonnia vuodessa. Liitteeseen 1 on koottu tarkat vuosikulutukset nestekaasulle. (15.)

Vuoden 2014 tilastojen perusteella nestekaasutoimituksia on lämmityskuukausina keskimäärin 3–4 kertaa kuussa. Kylmimpinä talvipäivinä, yleensä tammikuussa, säiliötä on täytettävä noin joka toinen päivä. (15.)

4.3.2 Raskas polttoöljy

Syyskuussa 2012 otettiin käyttöön kaivoksella kiinteän polttoaineen kattila, jonka teho on 2 MW. Kattilalla tuotetaan kaukolämpöä kaivosalueelle ja siitä vastaa TOVO eli Tornion Voima. Lämmityskaudella pääosa kaukolämmöstä tuotetaan kiinteän polttoaineen kattilalla ja huipputehot tuotetaan raskaan polttoöljyn kattilalla. Kesällä kaukolämpökuorman tippuessa alle kiinteän polttoaineen kattilan minimitehon kaukolämmön tuottaa edelleen POR-kattila. Talviaikaan tarvittava höyry tuotetaan aina POR-kattilalla. Kiinteän polttoaineen kattila on vähentänyt raskaan polttoöljyn

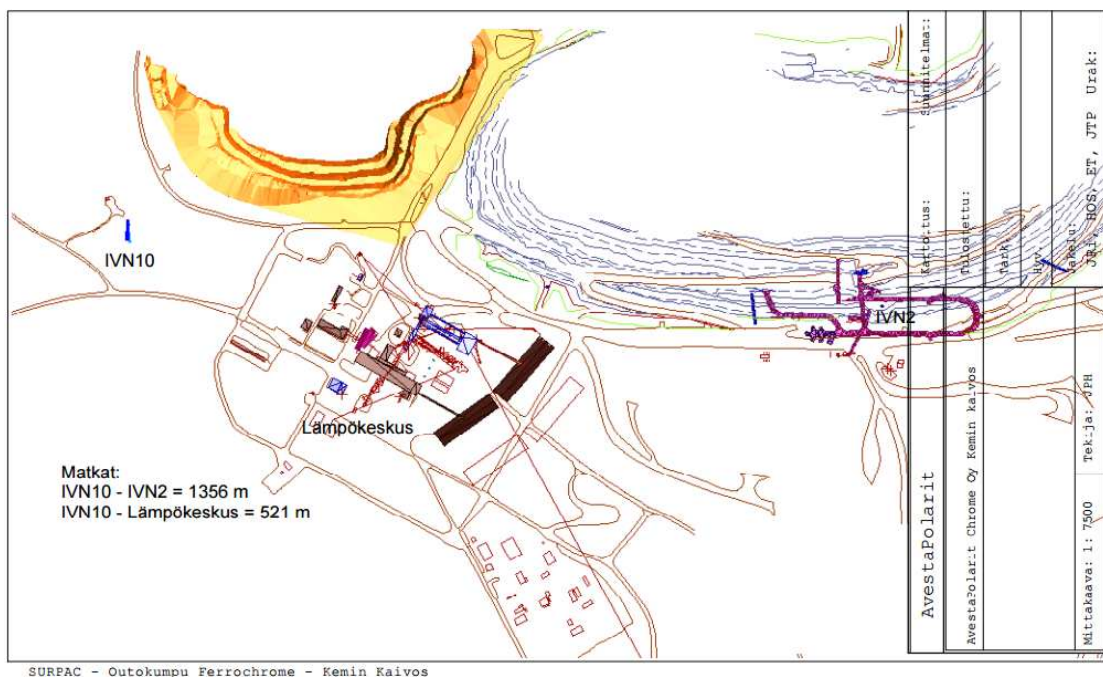
kulutusta kaivoksella. Ennen KPA-kattilan käyttöönottoa POR:n kulutus on ollut keskimäärin noin 320 tonnia ja KPA-kattilan käyttöönoton jälkeen noin 210 tonnia. Liitteessä 1 on esitetty raskaan polttoöljyn vuosikulutukset vuosina 2010–2014.

5 JÄRJESTELMIEN MUUNTAMINEN LNG:LLE

LNG eroaa ominaisuuksiltaan nestekaasusta ja POR:sta, minkä vuoksi jo käytössä olevia laitteistoja ei välttämättä voida suoraan käyttää LNG:lle. Suurimpana erona on LNG:n erittäin alhainen lämpötila nestemäisenä verrattuna nestekaasun lämpötilaan vastaavassa olomuodossa.

5.1 Sijointivaihtoehdot laitteistolle

Molemmat IVN-kanavat ja POR-kattilat sijaitsevat melko etäällä toisistaan. Kuvassa 1 vanhempi IVN2-kanava ja nestekaasujärjestelmä ovat oikeassa laidassa ja uudempi IVN10-kanava sijaitsee kaivoksen porttien ulkopuolella kuvan vasemmassa laidassa. Linnuntietä etäisyyttä näillä kanavilla on noin 1,4 kilometriä. POR-kattilat eli lämpökeskus sijaitsee lähes keskellä kuvaa. Uudemmalta IVN-kanavalta matkaa kertyy lämpökeskukselle linnuntietä 521 metriä ja vanhemmalta kanavalta matkaa on noin kilometri.



KUVA 1. Raitisilmakanavien ja lämpökeskuksen sijainti kaivosalueella (16)

LNG-järjestelmän sijoituspaikaksi ei ole vain yhtä vaihtoehtoa. Muutos LNG:ksi on suunniteltu tässä opinnäytetyössä toteutettavan joko ainoastaan yhdellä LNG-järjestelmällä tai vaihtoehtoi-

sesti kahdella järjestelmällä. Yhden järjestelmän toteuttamissuunnitelmissa säiliö ja höyrystinkeskus sijoitettaisiin mahdollisimman lähelle lämpökeskusta eli kattiloita, mistä LNG johdettaisiin putkea pitkin höyrystettynä molemmille IVN-kanaville sekä kattiloille. Kahden LNG-järjestelmän toteuttamissuunnitelmissa sijoitettaisiin molemmille IVN-kanaville omat säiliöt ja höyrystinkeskukset, joista toisesta johdettaisiin polttoainetta myös kattiloille.

5.2 Laitteisto

LNG:ksi muunnettavien kohteiden yhteinen maksimiteho tulisi olemaan 19 MW, sillä molempien IVN-kanavien maksimi poltinteho on 8 MW ja kummankin kattilan 1,5 MW. Taulukkoon 2 on kerätty liitteestä 1 keskimääräiset vuosikulutukset nestekaasulle ja raskaalle polttoöljylle. Siitä nähdään, että keskimäärin vuosina 2010–2014 nestekaasua on kulunut 640 tonnia raitisilman lämmittämiseen IVN2:ssa. Molempien IVN-kanavien ollessa samankokoiset nestekaasun kulutus tulee kaksinkertaistumaan. POR:n kulutuksen oletetaan pysyvän vuosien 2013–2014 tasolla eli noin 210 tonnia vuodessa.

Energiaksi kulutukset voidaan muuttaa kaavan 6 mukaisesti kertomalla polttoaineen kulutus sen tehollisella lämpöarvolla. Nestekaasun tehollisena lämpöarvona on käytetty taulukossa 1 ilmoitettua 12,86 kWh/kg, joka on sama kuin 12,86 MWh/tn. POR:n tehollinen lämpöarvo on 11,3 MWh/tn.

$$Q = \text{tehol. lämpöarvo} * m$$

KAAVA 6

Q = Polttoaineesta saatava energia (MWh)

tehol. lämpöarvo = Polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MWh / tn)

m = Polttoaineen massa (tn)

Lisäksi polttoaineista saadut MWh:t on muunnettu taulukossa 2 vastaamaan tonnimääriä LNG:nä jakamalla energiamäärä LNG:n lämpöarvolla. Taulukosta nähdään, että polttoainetta tarvitaan massaltaan vähemmän LNG:nä, kuin nykyisiä polttoaineita tarvitaan. LNG:tä tarvittaisiin keskimäärin 1360 tonnia vuodessa, jotta sillä voitaisiin korvata nestekaasun ja raskaan polttoöljyn kulutus.

TAULUKKO 2. Polttoaineiden kulutukset ja energiamäärät sekä vastaavuus LNG:nä

	Tonneja vuodessa keskim	MWh vuodessa keskim	LNG:nä tonneja
Nestekaasu	640,0	8230,0	592,0
Nestekaasu	640,0	8230,0	592,0
POR	210,0	2440,0	176,0
Yhteensä	1490,0	18900,0	1360,0

19 MW:n maksimiteho ja 18900 MWh:n energiankulutus vuodessa tarkoittaisi sitä, että mikäli kaikki nämä kolme kohdetta korvataan LNG:llä, tulee energiankulutus kasvamaan 2,4-kertaiseksi verrattuna nykyiseen nestekaasun käyttöön. Tällöin laitteiston kapasiteettia tulee kasvattaa lähes 2,5-kertaiseksi verrattuna yhden nestekaasujärjestelmän kapasiteettiin, jotta se olisi riittävä käytettäväksi.

LNG-järjestelmien tarjoukset on hankittu Triangle Partners Oy:n Tuomo Rytköjän kautta. Tarjoukset on antanut Chart Industries:iin kuuluva Chart Ferox -yhtiö, joka toimittaa Chart Industriesin valmistamia LNG-järjestelmiä. Opinnäytetyössä on keskitytty heidän tarjoamiin vaihtoehtoihin.

5.2.1 Säiliö

Nestekaasusäiliön sisällön minimilämpötila on suunniteltu nestekaasun kiehumispisteen mukaan -40 °C :seen. Maakaasun kiehumispiste on huomattavasti alhaisempi ja nestemäisenä sen lämpötila on noin -160 °C , minkä vuoksi LNG-säiliön rakenne täytyy olla erilainen nestekaasusäiliöön verrattuna.

LNG-säiliöt ovat kaksivaippaisia tyhjöeristettyjä paineastioita, joissa on tyhjön lisäksi myös perliittäyte. Ulompi seinä on useimmiten paksua betonia ja sisempi kylmän kestävästä ruostumatonta terästä tai nikkelterästä. LNG-säiliöt ovat yleensä maanpäällisiä pysty- tai vaakamallisia säiliöitä. Tavallisimmin alle 150 m^3 :n säiliöt ovat pystyrakenteisia, mikä on sijoitusteknillisesti ja termodynaamisesti toimivin ratkaisu. Kaksoisvaipparakenne ja tyhjöeristys suojaavat säiliötä myös ulkopuolelta tulevaa vahinkovaaraa vastaan, minkä ansiosta LNG-varaston sijoittaminen on helpompaa kuin vastaavan kokoisen nestekaasuvaraston. Lisäksi kuvan 2 mukaisesti LNG-säiliö ja höyrystimet voidaan sijoittaa samaan paikkaan. (3, s. 16–17.)

Maakaasuyhdistyksen vuosikirjassa Gasum Oy:n asiakaspalvelupäällikkö Arto Riikonen kirjoittaa, että tyypillisesti säiliöiden koko mitoitetaan noin viikon kaasutarvetta vastaavaksi. Nestekaasusäiliön koko on mitoitettu aikaisemmin lasketun perusteella kolmeksi päiväksi maksimiteholla, joten LNG-säiliö mitoitetaan myös noin kolmen vuorokauden tarpeeseen riittäväksi. (3, s. 16–17.)



KUVA 2. LNG-järjestelmä (17)

Varastosäiliön maksimi täyttöaste on 90 %, mikä on samaa luokkaa nestekaasusäiliön kanssa. Säiliön lämpöhäviöiden aiheuttama LNG:n höyrystyminen on päivässä noin 0,12 % säiliön sisältämästä kaasumäärästä. Säiliön sisällä tapahtuvaa höyrystymistä kutsutaan boil off -ilmiöksi. Jotta säiliön höyrinpaine ei kohoaisi liikaa, tulisi päivittäin käyttää vähintään tuo 0,12 % kaasumäärästä. Käytännössä LNG-järjestelmä voi kuitenkin olla useita päiviä käyttämättä ilman, että säiliön varoventtiili avautuisi. Säiliön maksimi paine 60–108 m³:n kokoisissa säiliöissä on Chart Industriesin mukaan joko 11 tai 17 bar. (3, s. 17;16.)

5.2.2 Höyrystimet

Nestekaasuhöyrystimien suunnittelulämpötila on –40...+100 °C, jolloin ne eivät ole sopivia LNG:n höyrystämässä käytettäväksi. Höyrystimien suunnittelulämpötila tulee olla –160 – +30 °C ja suunnittelpaine vähintään 15 bar. LNG höyrystetään noin 11 bar:in paineessa maakaasuksi ja höyrystinkeskukselta lähtiessä maakaasun paine on tavallisesti 4 bar. (18, s. 49–52.)

Taulukossa 3 on tiettyssä paineessa metaanin höyrystymislämpötila sekä ominaisentalpiat kylläisenä nesteenä (h') sekä kylläisenä höyrynä (h''). Taulukossa ei ollut suoraan annettu arvoja 11 bar:in paineessa, joten ne täytyi interpoloida kaavan 7 mukaisesti. Punaisella ilmoitetut arvot ovat interpoloinnin tuloksia. (19, s.401; 19.)

TAULUKKO 3. Metaanin höyrystymislämpötilat ja ominaisentalpiat (19, s.401)

Paine	Höyrystymislämpötila	h'	h''
10,4 bar	150 K = -123,15 °C	-768,3 kJ/kg	-355,7 kJ/kg
11 bar	151,1 K = -122,06 °C	-763,713 kJ/kg	-355,504 kJ/kg
15,921 bar	160 K = -113,15 °C	-726,1 kJ/kg	-353,9 kJ/kg

$$\frac{p_L - p}{p_H - p_L} = \frac{h_L - h}{h_H - h}$$

KAAVA 7

p = Paine (bar)

Alaindeksi L = Taulukkoarvo alueen alapäässä

Alaindeksi H = Taulukkoarvo alueen yläpäässä

h = interpoloitava arvo, joko höyrystymislämpötila, h' tai h''

LNG-höyrystyy näin ollen noin -122 °C:n lämpötilassa. Kyseisessä lämpötilassa ja 11 bar:n paineessa voidaan kaavalla 8 laskea metaanin tarvitsema energia höyrystyäkseen, eli höyrystymislämpö (20).

$$r = h'' - h'$$

KAAVA 8

r = Höyrystymislämpö (kJ/kg)

h'' = Metaanin ominaisentalpia kylläisenä höyrynä 11 bar paineessa (kJ/kg)

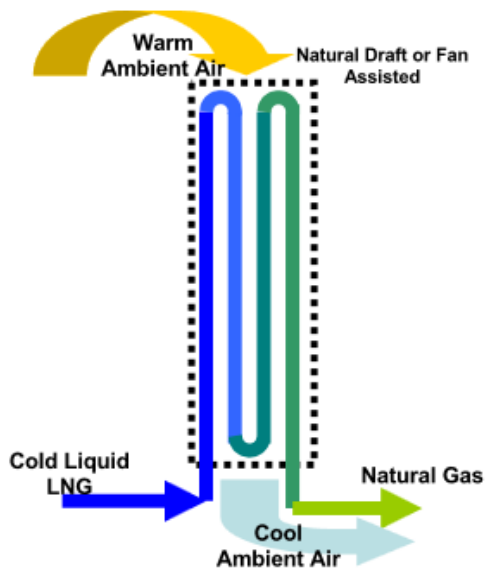
h' = Metaanin ominaisentalpia kylläisenä vetenä 11 bar paineessa (kJ/kg)

Sijoittamalla arvot kaavaan, höyrystymislämmöksi saadaan

$$r = -355,504 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left(-763,713 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 408,209 \text{ kJ/kg}$$

Opinnäytetyötä varten on kysytty tarjoukset LNG-järjestelmistä Chart Industriesiin kuuluvalta Chart Feroxilta. Höyrystimistä heidän valikoimiin kuuluvat ilmahöyrystimet ja vesipetihöyrystimet. (17.)

Ilmahöyrystimet höyrystävät LNG:n nimensä mukaisesti ilmalla. Kuvan 3 mukaisesti höyrystimen yläosaan johdetaan ympäristöstä ilmaa luonnollisen vedon avulla tai puhaltimella. Höyrystin koostuu alumiiniputkista, joissa LNG kiertää ja höyrystyy lämpimämmän ilman vaikutuksesta. Ilmahöyrystimistä saatavan kaasun lämpötila on noin 15 °C matalampi kuin höyrystimiä ympäröivän ilman lämpötila. Kaivoksella höyrystimiä käytetään pakkasilmoilla, joten ilmahöyrystimien yhteydessä tulee käyttää lisälämmittämiä, jolloin kaasun lämpötila saadaan sopivaksi. Maakaasu lämmitetään noin +10 °C:seen. (3, s. 16–17; 21.)



KUVA 3. Ilmahöyrystimen toimintaperiaate (22)

Tavallisesti LNG-höyrystimet tuplamitoitetaan kaasun tarpeeseen nähden. Ilmahöyrystimissä on tyypillistä höyrystimien huurrettuminen (kuva 4), jolloin höyrystin sammuu ja toinen puolikas höyrystimistä kytkeytyy käyttöön. Huurrettumista tapahtuu, kun ilmasta otetaan lämpöenergiaa höyrystämiseen ja sen seurauksena ilma jäähtyy alle sen kastepisteen ja huurtuu. Kuvassa 4 on ilmahöyrystimiä, joissa on nähtävissä selvää huurrettumista höyrystimien alaosassa sekä maanpinnalla. (3, s. 16–17; 23.)



KUVA 4. Ilmahöyrytimien huurrettuminen (23)

Kaivoksen alueella kulkee myös kaukolämpölinjat, joten selvityksessä huomioitiin myös kaukolämmöllä toimivien höyrytimien vaihtoehto. Chart Industries tarjoaa ilmahöyrytimien lisäksi myös vesipeti-höyrytimiä, joita voidaan lämmittää esimerkiksi maakaasulla tai muulla lämmönlähteellä, kuten tässä tapauksessa kaukolämmöllä. (17.)

Kaukolämpöhöyrytimien höyryttämiseen tarvittava energia voidaan laskea kaavalla 9. (24, s. 228).

$$Q = m * r$$

KAAVA 9

Q = Höyryttämiseen tarvittava lämpöenergia (kJ)

m = Nesteen massa (kg)

r = Höyrytyslämpö (kJ/kg)

5.2.3 Putkisto

Chart Feroxin toimittamiin LNG-järjestelmiin kuuluu myös LNG-putkisto komponenttien välille. Putkistoon kuuluu kaikki osat, joilla varmistetaan täysin automaattinen tai puoliautomaattinen toiminta kaasun tuottamiseen vaaditussa paineessa ja lämpötilassa. Näin ollen nestemäisen maakaasun putkistoja ei tarvitse itse mitoittaa ja tilata erikseen. (17.)

LNG-järjestelmiin eivät kuulu maakaasun siirtoputkisto höyrystimiltä kulutuskohteisiin, joten ne on hankittava erikseen. Maakaasuputkistoa varten on kysytty kustannusarvioita maan alle vedettävästä muoviputkesta. Putkistojen koko on mitoitettu kaavojen 10–12 avulla. Kaavassa 10 lasketaan ensiksi polttoaineen tarvittava tilavuusvirta.

$$q_v = \frac{\Phi}{\text{tehol.lämpöarvo}}$$

KAAVA 10

q_v = Kaasun tilavuusvirta (m³/s)

Φ = Tarvittava poltinteho (MW = MJ/s)

tehol. lämpöarvo = Polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/m³)

Kaavalla 11 saadaan laskettua putken tarvittava poikki-pinta-ala edellä laskettua tilavuusvirtaa hyväksikäyttäen. Mitoituksessa maakaasulle käytetään virtausnopeutta 10 m/s.

$$A = \frac{q_v}{v}$$

KAAVA 11

A = Putken poikkipinta-ala (m²)

q_v = Kaasun tilavuusvirta (m³/s)

v = Kaasun virtausnopeus (m/s)

Putken poikkipinta-alan kautta saadaan laskettua putken halkaisija (kaava 12).

$$d = \sqrt{\frac{A*4}{\pi}}$$

KAAVA 12

d = Putken halkaisija (m)

A = Putken poikkipinta-ala (m²)

Putkistojen pituudet on arvioitu Kemin kaivoksen aluekuvan perusteella ja kuvissa 5–7 esitetyillä sijoitusvaihtoehdoilla.

5.2.4 Polttimet

Kummassakin raitisilmakanavassa on kaksi kappaletta Eclipse AH-2 polttimia, joiden yksittäinen teho on 4 MW. GAS Systems, Finland Oy on polttimien toimittaja Suomessa ja heidän mukaansa polttimet sopivat sellaisenaan myös maakaasulle, joten niitä ei tarvitse vaihtaa. (25.)

5.2.5 Paineenalennuslaitteisto

Nykyisessä nestekaasujärjestelmässä höyrystinkeskukselta lähtevän kaasun siirtopaine on 1,0...1,5 bar. Polttimille tullessa se alennetaan paineenalennuslaitteistossa polttimien liitäntäpaineeseen, noin 100 mbar:iin. (13.)

Tyypillisin maakaasun ulostulopaine LNG-höyrystimien jälkeen on 4 bar, joten polttimille tultaessa painetta on alennettava enemmän. Nykyinen paineenalennuslaitteisto on liian pieni, jotta kaasusta saataisiin maksimi teho. Näin ollen se on uusittava LNG:n käyttöä varten. Tarkoituksena olisi kuitenkin käyttää nykyistä poltinhjauskeskusta. Uutta paineenalennuslaitteistoa varten on kysytty tarjous Gas Systems, Finland Oy:ltä, jolloin laitteiston valmistaja olisi polttimien tapaan Eclipse (liite 2). (25.)

5.3 POR-kattilat

Öljypolttimet ja kaasupolttimet eroavat rakenteeltaan toisistaan, sillä öljy täytyy ensiksi sumuttaa eli hajottaa pieniksi pisaroiksi, jotta se palaisi tulipesässä täydellisesti ja riittävän nopeasti. Kaasupolttimissa kaasu ja palamisilma taas ovat jo valmiiksi samassa faasissa, joten sumutusta ei tarvita. (26, s.129.)

Raskaan polttoöljyn polttimet ovat Oilonin valmistamat ja Oilon tarjoaa myös LNG:lle sopivia polttimia. Vaihtoehtoina heillä on joko moduloiva-säätöinen poltin tai moduloiva-säätöinen poltin varustettuna sähköisellä suhdeseossäätimellä. Malliltaan molemmat tarjotut vaihtoehdot ovat GP-140M. Polttimista pyydetty tarjous on liitteessä 3. (27.)

5.4 Operointi

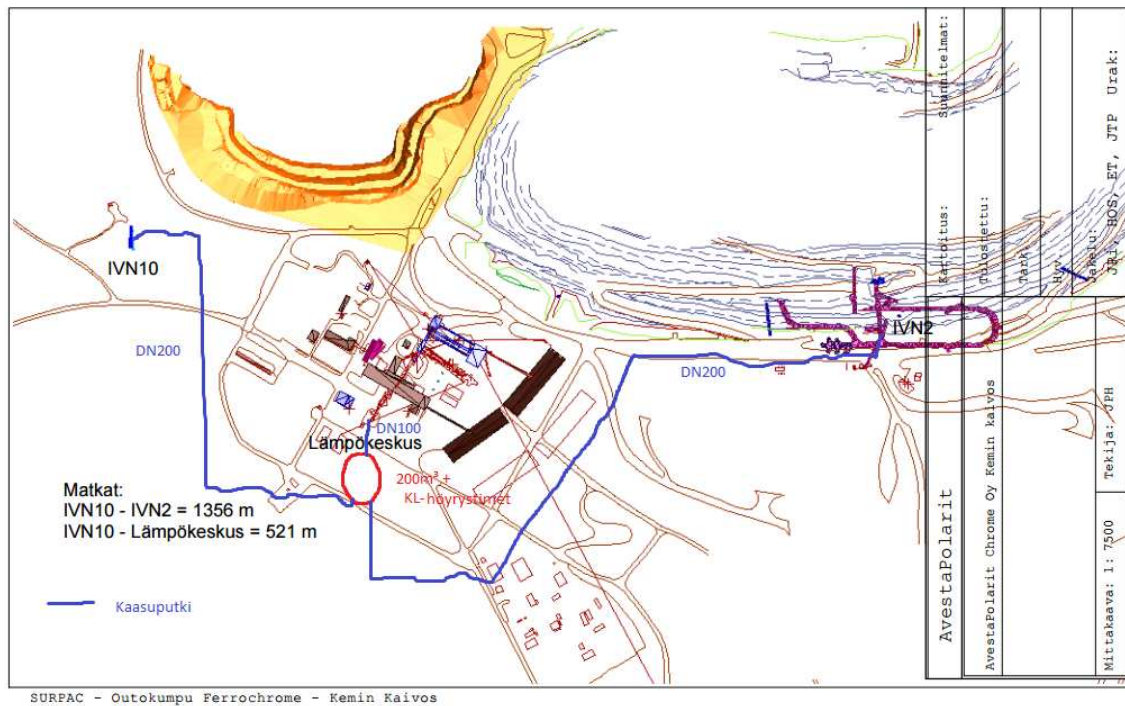
Nykyistä nestekaasujärjestelmää operoi Neste. Se huolehtii nestekaasujärjestelmän ylläpidosta ja huollosta sekä nestekaasusäiliön täytöstä kokonaan. POR-järjestelmästä vastaa nykyisin TOVO. Mikäli nestekaasu ja POR vaihdetaan LNG:hen, tulee kaivoksen huolehtia LNG-järjestelmien operoinnista, ylläpidosta ja huollosta omaa henkilöstöä tai ulkopuolista toiminnanharjoittajaa käyttäen. Myös LNG:n kuljetuksista ja säiliöiden täytöstä tulee sopia. (7.)

6 TOTEUTUSEHDOTUKSET JA NIIDEN INVESTOINTIKUSTANNUKSET

Opinnäytetyössä on keskitytty neljään erilaiseen toteutusvaihtoehtoon. Seuraavassa on esiteltyinä jokainen vaihtoehto tarkemmin.

6.1 Toteutusehdotus 1

Vaihtoehdossa 1 koko alueelle tarvittava LNG säilytetään ja höyrystetään yhdessä paikassa. LNG-varaston ja höyrystinkeskuksen sijoituspaikka on mahdollisimman lähellä lämpökeskusta kaukolämpölinjan vieressä. Höyrystintyyppinä käytetään kaukolämpöhöyrystimiä. Kuvassa 5 on punainen ympyrä merkitsemässä LNG-järjestelmän arvioitua sijaintia ja sinisellä on hahmoteltu maanalaiset maakaasuputket molemmille IVN-kanaville ja POR-kattiloille.



KUVA 5. Hahmotuskuva toteutusehdotuksesta 1

Mikäli kaivokselle tarvittava LNG sijoitettaisiin vain yhteen säiliöön, täytyisi säiliön olla nykyistä 99 m³:n säiliötä noin 2,5-kertaa suurempi, jotta kaasua riittäisi edelleen kolmen vuorokauden tarpeeseen. Kylmimpään talviaikaan säiliön täyttö olisi tällöin edelleen keskimäärin joka toinen päivä.

Nykyistä nestekaasujärjestelmää kuitenkin harvoin ajetaan täydellä teholla, joten pienempikin säiliö riittäisi. Chart Feroxilta säiliöiden kokovaihtoehtoiksi saatiin 108 m³ ja 204 m³.

Kaavaan 1 sijoittamalla 204 m³:n kokoisesta säiliöstä 90 %:n täyttöasteella saadaan kaasua

$$0,9 * 204 \text{ m}^3 * \frac{421 \text{ kg/m}^3}{0,72 \text{ kg/m}^3} = 107\,355 \text{ m}^3$$

Kaavoista 2 ja 3 saadaan laskettua kaasun massavirta ja tilavuusvirta, kun tarvittava poltinteho on 19 MW.

$$q_m = \frac{19 \text{ MJ/s}}{50 \text{ MJ/kg}} = 0,38 \text{ kg/s} = 1368 \text{ kg/h}$$

$$q_v = \frac{0,38 \text{ kg/s}}{0,72 \text{ kg/m}^3} = 0,527778 \text{ m}^3/\text{s} = 1900 \text{ m}^3/\text{h}$$

Kaavalla 4 saadaan säiliön riittävydeksi

$$\frac{107\,355 \text{ m}^3}{0,527778 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 3600} = 56,5 \text{ h} = 2,35 \text{ vrk}$$

Täydellä 19 MW:n teholla ajettaessa 204 m³:n säiliö kestäisi siis 2,4 vuorokautta. Saatujen tarjouksien perusteella 204 m³:n säiliö olisi vaakarakenteinen ja yli 10 kertaa kalliimpi kuin 108 m³:n pystyrakenteiset säiliöt. Halvempaa olisi siis toteuttaa järjestelmä jakamalla LNG kahteen eri 108 m³:n säiliöön. Investointikustannuksia varten vaihtoehto on ajateltu toteutettavan kahdella 108 m³:n säiliöllä.

Säiliöiltä LNG johdetaan vieressä sijaitsevalle höyrystinkeskukselle. 19 MW:n maksimitehoa varten polttoainetta tarvitaan 1900 m³/h, mikä tarkoittaa, että höyrystimien kapasiteetti on oltava vähintään saman verran. Aikaisemmin sanottiin, että höyrystimet mitoitetaan tuplateholle tarpeeseen nähden, mutta Chart Ferox tarjosi 1900 m³:n höyrystystarpeelle höyrystimiä, joiden maksimikapasiteetti on 2800 m³/h. Näin ollen höyrystimien kapasiteetti on noin 1,5 kertaa tarvetta suurempi. Taulukkoon 4 on koottu toteutusehdotuksen pääpiirteet.

TAULUKKO 4. Toteutusehdotus 1

	Toteutustapa	Huom
LNG-järjestelmän sijainti	Lämpökeskuksen lähelle	
Tarvittava teho	19 MW	
Säiliön koko	2 x 108 m ³	Tai 1 x 204 m ³ → paljon kalliimpi
Höyrystintyyppi	Kaukolämpöhöyrystimet	
Höyrystystarve maksimikulutuksella	1900 m ³ /h	
Höyrystyskapasiteetti	2800 m ³ /h	

Höyrystinkeskukselta maakaasu johdetaan molemmille IVN-kanaville ja molemmille kattiloille. Putkien halkaisijat on laskettu kaavojen 10–12 avulla ja tulokset koottu taulukkoon 5. 8 MW:a varten putken sisähalkaisijaksi saatiin 0,168 m, jolloin DN200-putki (219,1 x 5,0) olisi sopiva. Kattiloille menevän kaasuputken sisähalkaisijaksi 3 MW:a varten saadaan 0,103 m. Tällöin sopiva putkikoko olisi DN100 (114,3 x 3,6). Putkipituudet on arvioitu kaivoksen aluekuvasta, joten ne voivat poiketa jonkin verran todellisuudessa. Liitteessä 1 on annettuna DN200 ja DN100-putkien hinnat metriä kohden. (28.)

TAULUKKO 5. Putkisto

	Teho, MW	Tilavuusvirta, m ³ /s	kaasun vir- tausnopeus, m/s	Putken Ala, m ²	Putken halkaisija, m	Putkikoko	Putkipituus, m
IVN10- kanavalle	8 MW	0,222	10	0,0222	0,168	DN200	600
IVN2- kanavalle	8 MW	0,222	10	0,0222	0,168	DN200	1200
Kattiloille	3 MW	0,0833	10	0,00833	0,103	DN100	40

LNG:n keskimääräinen kulutus on taulukon 2 mukaisesti 1360 tonnia vuodessa. Kaavan 9 mukaisesti saadaan laskettua kyseisen massan höyrystämiseen tarvittava energiamäärä. Kaavassa käytetään jo kaavalla 8 laskettua höyrystyslämpöä, 408,208 kJ/kg.

$$1\,360\,000\text{ kg} * 408,208 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 554\,854\,862\text{ kJ} = 554\,855\text{ MJ}$$

LNG:n höyrystämiseen tarvitaan siis 554 855 MJ energiaa, joten tämän energiamäärän höyrystimien on saatava kaukolämmöstä. Megajoulet voidaan muuntaa kilowattitunneiksi kaavan 13 mukaisesti.

$$3,6\text{ MJ} = 1\text{ kWh}$$

KAAVA 13

Käyttämällä muuntokaavaa hyväksi saadaan 154 126 kWh eli 154,1 MWh. Tästä saadaan höyrystämiseen kuluvan energian kustannus kun tiedetään kaukolämmön hinta €/MWh. Liitteessä 1 on laskettu kaukolämpöhöyrystimille kertyvä vuosikustannus, kun kaukolämmön lisäksi mukaan on laskettu pumppujen kuluttama sähkö. Vertaamalla kaukolämpöhöyrystimien vuosikustannuksia nykyisten höyrystimien vuosikustannuksiin, saadaan vuodessa kertyvät säästöt selville. Höyrystimet joutuvat olemaan käynnissä vuoden ympäri, sillä POR-kattilat tarvitsevat polttoainetta myös kesällä, toisin kuin IVN-kanavien lämmitysjärjestelmät.

Liitteessä 1 on laskettu vuodessa kertyvät säästöt, kun nestekaasu ja POR vaihdetaan halvempaan polttoaineeseen, eli LNG:hen. Chart Feroxin tarjous vaihtoehdosta on liitteessä 4.

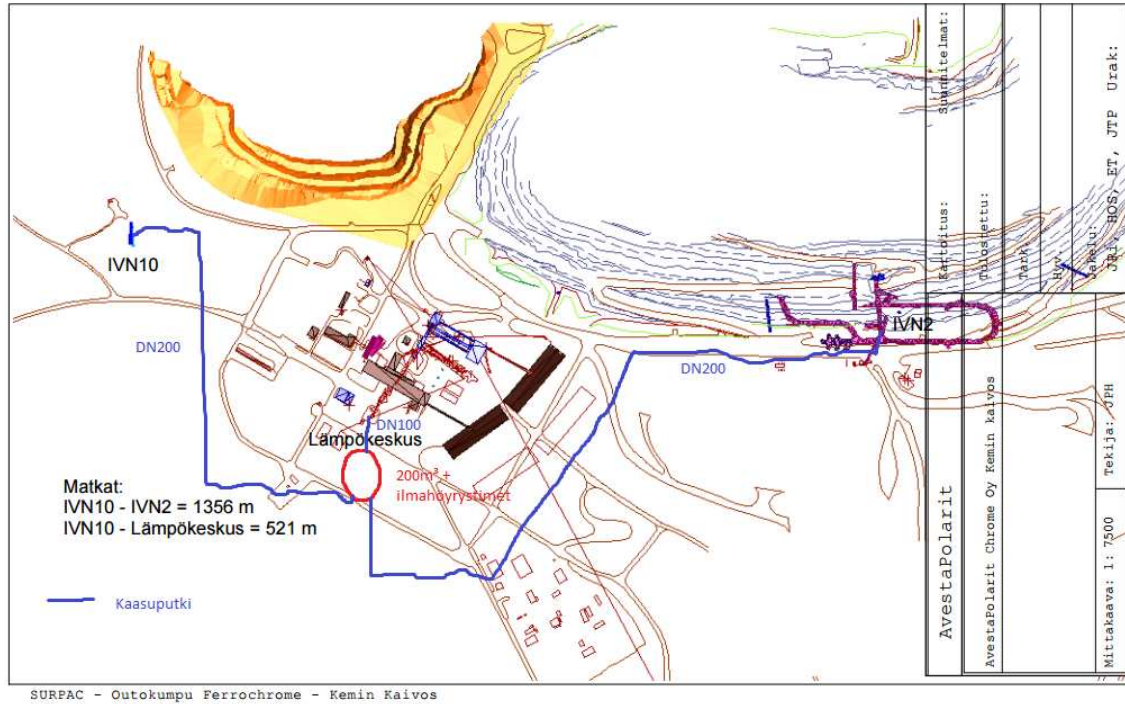
Taulukkoon 6 on koottu kokonaisinvestoinnin hinta 10 %:n kustannusvarauksella, polttoaineen ja höyrystimien vaihdosta saatavat säästöt vuositasolla sekä näistä saatava arvio suorasta takaisinmaksuajasta. Liitteessä 1 on tarkemmin eritelty investointihinnat LNG-järjestelmälle, putkistolle, polttimille ja paineenalennuslaitteistolle.

TAULUKKO 6. Toteutusehdotuksen 1 investointikustannukset, vuosisäästöt ja takaisinmaksuaika

Kohde	
Kokonaisinvestointi kustannusvarauksella (10 %)	3 000 000 €
Vuosisäästöt	300 000 €
Takaisinmaksuaika	10

6.2 Toteutusehdotus 2

Vaihtoehto 2 on muuten täysin samanlainen vaihtoehdon 1 kanssa, mutta höyrystiminä käytetään ilmahöyrystimiä. Vaikka kaukolämpöä ei tarvita höyrystimille, sijoitettaisiin säiliöt ja höyrystinkeskus samoille paikoille. Kuvasta 6 nähdään, että järjestelmien ja putkistojen sijainnin ovat samat toteutusehdotuksen 1 kanssa.



KUVA 6. Hahmotuskuva toteutusehdotuksesta 2

Taulukon 7 mukaisesti säiliöitä valitaan kaksi 108 m³:n säiliötä ja ilmahöyrystimien kapasiteetti on sama kuin kaukolämpöhöyrystimien. Putkistot ovat myös samanlaiset (taulukko 5).

TAULUKKO 7. Toteutusehdotus 2

	Toteutustapa	Huom
LNG-järjestelmän sijainti	Lämpökeskuksen lähelle	
Tarvittava teho	19 MW	
Säiliön koko	2 x 108 m ³	Tai 1 x 204 m ³ → Kalliimpi
Höyrystintyyppi	Ilmahöyrystimet	
Höyrystystarve maksimikulutuksella	1900 m ³ /h	
Höyrystyskapasiteetti	2800 m ³ /h	

Ilmahöyrystimien käyttökustannukset koostuvat lähinnä kaasun lämmitykseen käytettävästä sähköstä. Lisäksi pieniä summia koostuu mm. ohjausjärjestelmän kuluttamasta sähköstä. Vuosittaisen käyttökustannusten laskemista varten Chart Ferox toimitti valmiin Excel-laskupohjan (liite 6). Heidän toimittamansa tarjous LNG-järjestelmästä on edellisen vaihtoehdon tapaan liitteessä 4.

Liitteessä 1 on laskettuna sekä nykyisten höyrystimien että ilmahöyrystimien käyttökustannukset vuodessa. Ilmahöyrystimet ovat käytössä vuoden ympäri ja kaasun lämmitystarpeeksi on arvioitu vuodessa 7 kuukautta. Muuna aikana höyrystimien käyttö on erittäin energiatehokasta, sillä lämmittämiä ei tarvita eli ulkoiselle energialle ei ole tarvetta. Näiden lisäksi liitteessä on laskettu halvempaan polttoaineeseen vaihdettaessa saatavat säästöt.

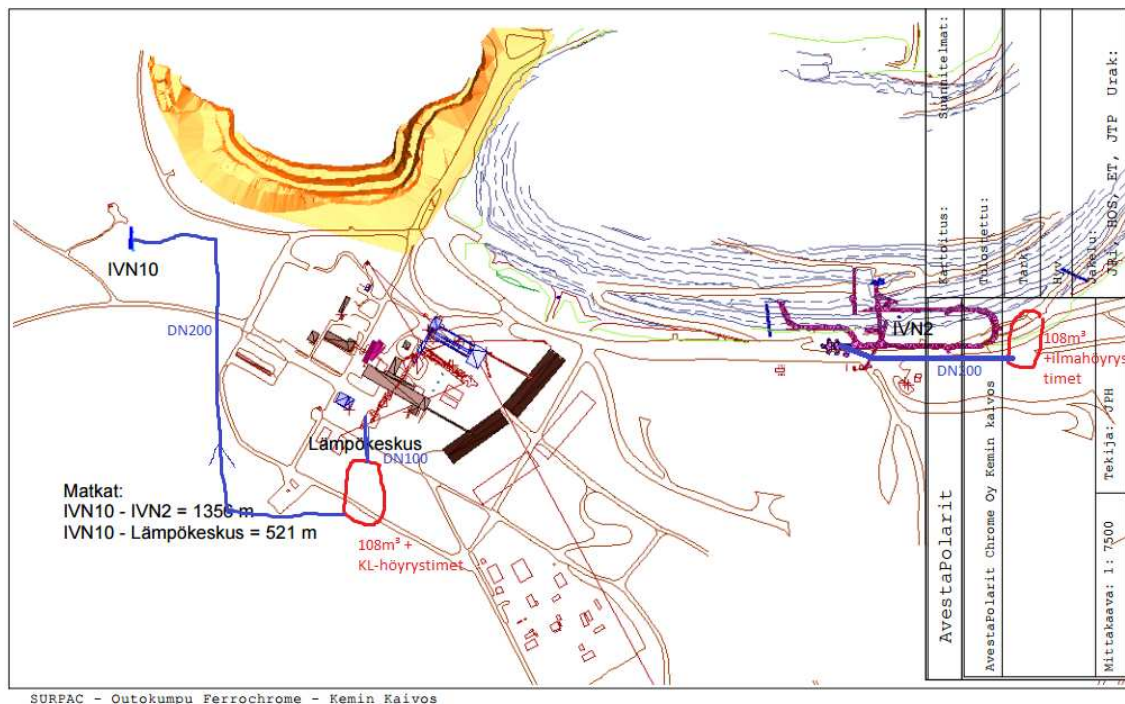
Taulukossa 8 on vaihtoehdon 2 investointikustannukset 10-prosentin kustannusvarauksella, ja ne on tarkemmin eritelty liitteessä 1. Lisäksi taulukossa on vuodessa kertyvät säästöt, jotka koostuvat höyrystimien käyttökustannusten pienenemisestä ja halvemmasta polttoaineesta saatavista vuosisäästöistä. Taulukkoon on myös laskettu takaisinmaksuaika.

TAULUKKO 8. Toteutusehdotuksen 2 investointikustannukset, vuosisäästöt ja takaisinmaksuaika

Kohde	
Kokonaisinvestointi kustannusvarauksella (10 %)	3 070 000 €
Vuosisäästöt	300 000 €
Takaisinmaksuaika	10,1

6.3 Toteutusehdotus 3

Vaihtoehdossa 3 LNG-järjestelmiä hankittaisiin kaksi. Toinen järjestelmä sijoitettaisiin IVN20-kanavan yhteyteen ja toinen järjestelmä lämpökeskuksen viereen (kuva 7).



KUVA 7. Hahmotuskuva toteutusehdotuksesta 3

Taulukon 9 mukaisesti 1. järjestelmästä eli kohteesta 1 kaasua johdetaan ainoastaan IVN2-kanavalle. Kohteesta 2 sitä jaetaan sekä IVN10-kanavalle että POR-kattiloille. Säiliökoot ja määrät ovat edelleen samat, nyt ne vain sijoitetaan kahteen eri paikkaan.

Kohteessa 1 käytetään ilmahöyrystimiä ja kohteessa 2 kaukolämpöhöyrystimiä. Kohteen 1 höyrystystarve 8 MW:n poltintehoa varten saadaan yhdistämällä kaavat 2 ja 3.

$$q_v = \frac{\frac{8 \text{ MJ/s}}{50 \text{ MJ/kg}}}{0,72 \text{ kg/m}^3} = 0,2222 \text{ m}^3/\text{s} = 800 \text{ m}^3/\text{h}$$

Kohteeseen 2 kaavailtujen ilmahöyrystimien höyrystystarve voidaan laskea samalla tavalla kun maksimi poltintehona on IVN2-kanavan ja kattiloiden yhteisteho eli 11 MW.

$$q_v = \frac{\frac{11 \text{ MJ/s}}{50 \text{ MJ/kg}}}{0,72 \text{ kg/m}^3} = 0,3055 \text{ m}^3/\text{s} = 1100 \text{ m}^3/\text{h}$$

Chart Feroxille ilmoitettiin kyseiset höyrystystarpeet ja taulukon 9 mukaisesti he tarjosivat kohteeseen 1 höyrystimien kapasiteetiksi 1200 m³/h ja kohteeseen 2 1700 m³/h. Liitteessä 5 on toteutusehdotuksesta 3 saatu tarjous Chart Feroxilta.

TAULUKKO 9. Toteutusehdotus 3

	Kohde 1	Kohde 2
LNG-järjestelmän sijainti	IVN2-kanavan viereen	Lämpökeskuksen lähelle
Tarvittava teho	8 MW	8 MW + 3 MW = 11 MW
Säiliön koko	108 m ³	108 m ³
Höyrystintyyppi	Ilmahöyrystimet	Kaukolämpöhöyrystimet
Höyrystystarve maksimikulutuksella	800 m ³ /h	1100 m ³ /h
Höyrystyskapasiteetti	1200 m ³ /h	1700 m ³ /h

Lämpökeskuksen läheisestä LNG-järjestelmästä maakaasuputkisto kattiloille ja IVN10-kanavalle on edelleen samanlainen vaihtoehtojen 1 ja 2 kanssa. IVN2-kanavan maksimi poltinteho on edelleen 8 MW, joten putkikoko pysyy myös tässä kohteessa samana. Järjestelmä tosin tulee huomattavasti lähemmäksi, joten maakaasuputken pituus vähenee. Putkiston mitoitusarvot on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Putkisto

	Teho, MW	Tilavuusvirta, m ³ /s	kaasun vir- tausnopeus, m/s	Putken Ala, m ²	Putken halkaisija, m	Putkikoko	Putkipituus, m
IVN10- kanavalle	8 MW	0,222	10	0,0222	0,168	DN200	600
IVN2- kanavalle	8 MW	0,222	10	0,0222	0,168	DN200	75
Kattiloille	3 MW	0,0833	10	0,00833	0,103	DN100	40

IVN2-kanavan viereen tuleva LNG-järjestelmä on käytössä ainoastaan raitisilman lämmityskuu-
kausina. Lämpökeskuksen viereiseen LNG-järjestelmään kuuluvat myös kattilat, minkä vuoksi
järjestelmä on käytössä ympäri vuoden.

Samalla tavalla kuten edellisissäkin toteutusehdotuksissa, taulukkoon 11 on koottu vaihtoehdon
kokonaisinvestointi, vuodessa saatavat säästöt ja näiden arvojen perusteella saatava suora ta-
kaisinmaksuaika. Tarkemmat erittelyt hinta-arvioista on liitteessä 1.

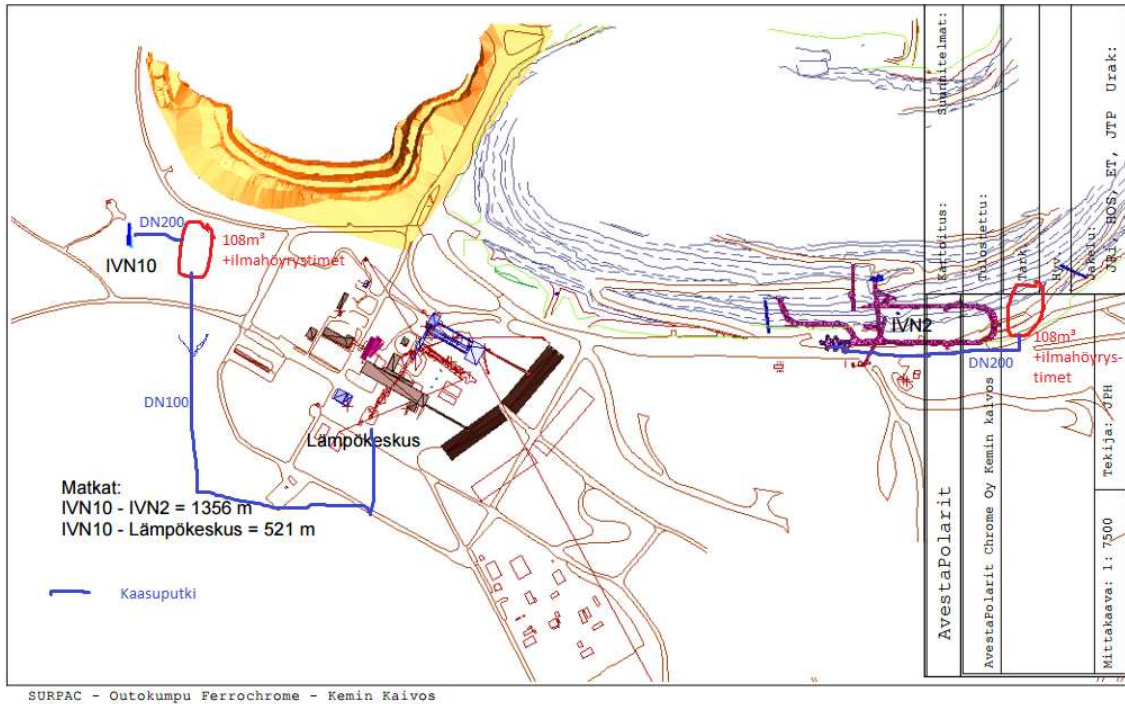
TAULUKKO 11. Toteutusehdotuksen 3 investointikustannukset, vuosisäästöt ja takaisinmaksuai-
ka

Kohde	
Kokonaisinvestointi kustannusvarauksella (10 %)	4 120 000 €
Vuosisäästöt	280 000 €
Takaisinmaksuaika	14,5

6.4 Toteutusehdotus 4

Neljännessä vaihtoehdossa järjestelmiä on myös kaksi. Erona edelliseen toteutusehdotukseen on
se, että nyt molemmissa järjestelmissä käytetään ilmahöyrystimiä. IVN2-kanavan viereen sijoitet-
tava järjestelmä on täysin samanlainen kuin vaihtoehdossa 3. Toisen järjestelmän sijoituskohde

on IVN10-kanavan vieressä, sillä kaukolämmölle ei ole enää tarvetta. Kuvassa 8 on nähtävissä LNG-järjestelmien sijoituskohteet.



KUVA 8. Hahmotuskuva toteutusehdotuksesta 4

Vaihtoehdon 3 mukaisesti toinen järjestelmä on IVN2-kanavalle ja toinen IVN10-kanavalle ja kattoille, joten tarvittavat polttoaine- ja tehomäärät ovat edelleen samat. Tällöin tarvittavat höyrystyskapasiteetit ovat myös samat. Taulukkoon 12 on koottu toteutusehdotuksen pääpiirteet.

TAULUKKO 12. Toteutusehdotus 4

	Kohde 1	Kohde 2
LNG-järjestelmän sijainti	IVN2-kanavan viereen	IVN10-kanavan viereen
Tarvittava teho	8 MW	8 MW + 3 MW = 11 MW
Säiliön koko	108 m ³	108 m ³
Höyrystintyyppi	Ilmahöyrystimet	Ilmahöyrystimet
Höyrystystarve maksimiteholla	800 m ³ /h	1100 m ³ /h
Höyrystyskapasiteetti	1200 m ³ /h	1700 m ³ /h

Toteutusehdotuksessa 3 lämpökeskuksen viereisestä järjestelmästä kuljetetaan DN200-putkella maakaasua IVN10-kanavalle 8 MW:n tehoa varten. Tässä toteutusehdotuksessa LNG-järjestelmä sijaitsee IVN10-kanavan vieressä, joten DN200-putken tarve on pienempi. Vuorostaan kattiloille menevän DN100-putken pituus kasvaa. Putkiston mitoitukset ja pituudet on koottu taulukkoon 13.

TAULUKKO 13. Putkisto

	Teho, MW	Tilavuusvirta, m ³ /s	kaasun vir- tausnopeus, m/s	Putken Ala, m ²	Putken halkaisija, m	Putkikoko	Putkipituus, m
IVN10- kanavalle	8 MW	0,222	10	0,0222	0,168	DN200	20
IVN2- kanavalle	8 MW	0,222	10	0,0222	0,168	DN200	75
Kattiloille	3 MW	0,0833	10	0,00833	0,103	DN100	600

Taulukossa 14 on esitetty LNG-järjestelmien toteutuksen kokonaisinvestoinnit ja vaihdosta saatavat vuosisäästöt. Lisäksi edellisten vaihtoehtojen tapaan on laskettu näistä saatava suora takaisinmaksuaika. Liitteessä 1 on eritelty tarkemmin investointikustannukset ja höyrystimistä ja polttoaineen vaihdosta saatavat säästöt. Chart FerroIn tarjous LNG-järjestelmästä on liitteessä 5.

TAULUKKO 14. Toteutusehdotuksen 4 investointikustannukset, vuosisäästöt ja takaisinmaksuaika

Kohde	
Kokonaisinvestointi	3 930 000 €
Vuosisäästöt	280 000 €
Takaisinmaksuaika	14,0

7 KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI

Mikäli molemmat IVN-kanavat vaihdettaisiin LNG:llä toimiviksi, vuosisäästöjä halvemman polttoaineen käytöstä kertyisi noin 210 000 €. POR:n korvaamisesta LNG:llä saavutettaisiin vuodessa säästöjä polttoainekustannuksissa noin 56 000 €. Näin ollen polttoainekustannuksissa voitaisiin vuodessa säästää lähes 270 000 € verrattuna nykyisin käytettävien nestekaasun ja POR:n kustannuksiin.

Yhden LNG-järjestelmän vaihtoehtoista kaukolämpöhöyrystimien vaihtoehto (toteutusehdotus 1) olisi investointikustannuksiltaan halvin eli noin 3 000 000 € sisältäen 10 %:n kustannusvarauksen. Ilmahöyrystimien vaihtoehto (toteutusehdotus 2) olisi noin 70 000 € kalliimpi investointi, mutta vastaavasti niillä saavutettaisiin vuodessa muutamia tuhansia suurempia säästöjä. Takaisinmaksuajoissa vaihtoehdolla ei juuri ole eroa, sillä toteutusehdotuksen 1 takaisinmaksuaika on 10 vuotta ja toteutusehdotuksen 2 vastaavasti 10,1 vuotta, mikä tarkoittaa käytännössä reilua kuukauden eroa.

Kahden erillisen LNG:n höyrytämisyjärjestelmän vaihtoehdot ovat investointikustannuksiltaan noin miljoona euroa kalliimpia kuin toteutusehdotukset 1 ja 2. Kallein investointi olisi toteutusehdotus 3, jossa toisessa höyrytinkeskuksessa on kaukolämpöhöyrystimet ja toisessa ilmahöyrystimet. Investoinnin hinnaksi tulisi tällöin noin 4 120 000 €. Mikäli molempiin höyrytinkeskuksiin valittaisiin ilmahöyrystimet toteutusehdotuksen 4 mukaisesti, olisi investointi noin 200 000 € halvempi. Vuosisäästöissä ei kuitenkaan ole juuri eroa, ainoastaan muutama tuhat euroa toteutusehdotus 3:n hyväksi. Takaisinmaksuajat ylittävät molemmissa vaihtoehdossa yli 10 vuotta, sillä toteutusehdotuksen 3 takaisinmaksuaika olisi 14,5 vuotta ja toteutusehdotuksen 4 vastaavasti 14 vuotta.

Vuosisäästöjä jokaisessa vaihtoehdossa kertyy keskimäärin 300 000 €, joten säästö olisi merkittävä. Investointikustannukset ovat 3–4 miljoonaa euroa, jolloin takaisinmaksuajat ovat kaikissa vaihtoehdossa joko 10 vuotta tai enemmän. Takaisinmaksuajat ovat näin ollen melko pitkät.

Toteutusehdotukset, joissa on kaukolämpöhöyrystimet kustantavat hieman enemmän, mutta vastaavasti vuosisäästöt ovat muutama tuhat euroa suurempia. Höyrytintyyppillä ei siis juuri ole merkitystä kustannuksiin ja sitä kautta takaisinmaksuajoihin.

Kannattavin toteutusvaihto lyhyimmän takaisinmaksuajan ja pienimmän investointihinnan perusteella olisi toteutusehdotus 1. Siinä kaksi säiliötä ja yksi höyrystin keskus sijoitettaisiin lämpökeskuksen viereen ja LNG:n höyrystämiseen käytettäisiin kaukolämpöä.

Kaivosalueella maanalaisen maakaasuputkiston vetäminen voi olla esimerkiksi toteutusehdotuksissa 1 ja 2 höyrystin keskukselta IVN2-kanavalle haasteellista. Putkea ei välttämättä saada kaivettua tarpeeksi syväälle, ja liikenne tällä välillä on kova, minkä vuoksi esimerkiksi putkisilloille saattaisi olla tarvetta. Tällöin putkiston hinta kasvaisi ja investointikustannukset voivat nousta lähemmäs toteutusehdotuksien 3 ja 4 investointihintoja.

Opinnäytetyössä nestekaasun hintana on käytetty sen keskimääräistä hintaa, joka on LNG:n hintaa kalliimpi. Nestekaasun hinta on kuitenkin ailahtelevaa ja saattaa välillä olla LNG:n hintaa alhaisempi. Tällöin opinnäytetyössä lasketut vuosisäästöt polttoaineen vaihdosta eivät pitäisi paikkaansa, eikä polttoaineen muuttaminen LNG:ksi olisi kannattavaa.

8 LOPPUSANAT

Opinnäytetyössä oli tarkoitus tehdä selvitys nestekaasun ja POR:n korvaamisesta LNG:llä Kemin kaivoksella. Ensiksi selvitettiin tarvittavat laitemuutokset ja sen jälkeen pyydettiin tarjoukset laitteistolle. Saatujen tarjousten perusteella laskettiin kustannusarviot hankkeiden toteuttamiselle. Voi olla, että kaikkea ei ole huomioitu kustannuksissa, minkä vuoksi kustannusarviot ja sitä kautta takaisinmaksuajat ovat karkeita.

Selvityksen myötä saatiin käsitys siitä, mitä polttoaineiden korvaaminen LNG:llä käytännössä tarkoittaisi. Selvityksen mukaan polttoainekustannuksissa säästettäisiin selvästi vuosittain. LNG on ollut hintakehitykseltään vakaampi polttoaine kuin nestekaasu ja raskas polttoöljy, mikä tarkoittaa, että LNG:llä korvattavat polttoaineet voivat välillä olla myös LNG:tä halvempia, jolloin polttoainesäästöjä ei vuodessa syntyisi.

LNG on kuitenkin ympäristöystävällisempi polttoainevaihtoehto, erityisesti raskaaseen polttoöljyyn verrattaessa. Lisäksi sitä saataisiin ”omasta” terminaalista läheltä. Jo näiden perusteella selvitys oli varmasti paikallaan. Opinnäytetyön myötä kaivoksella on materiaalia, jota käyttää apuna jos/kun hankkeen toteuttamista lähdetään suunnittelemaan.

LÄHTEET

1. Outokumpu. Saatavissa: <http://www.outokumpu.fi>. Hakupäivä 14.12.2015.
2. Outokummun Kemin kaivoksen malmivarat kasvoivat uusien kairausten myötä. 2014. Outokumpu Oyj. Saatavissa: <https://newsclient.omxgroup.com/cdsPublic/viewDisclosure.action?disclosureId=589375&messageId=729115>. Hakupäivä 14.12.2015.
3. Riikonen, Arto 2009. Nesteytetyn maakaasun rooli maailmalla kasvaa. Maakaasuyhdistyksen vuosikirja 2008–2009. S. 12–22. Saatavissa: http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/pdf/esitteet/Maakaasu_vuosik_2008_2009.pdf. Hakupäivä 14.12.2015.
4. Gasum. Saatavissa: <http://www.gasum.fi/>. Hakupäivä 14.12.2015.
5. Kosangas. Saatavissa: <http://www.kosangas.fi/>. Hakupäivä 14.12.2015
6. Manga Terminal Oy:ltä investointipäätös Tornion LNG-terminaalista. 2014. Manga Lng. Saatavissa: <http://www.torniomangalng.fi/manga-terminal-oyilta-investointipaatos-tornion-lng-terminaalista/>. Hakupäivä: 14.12.2015.
7. Kärki, Anne 2015. Teknisten palvelujen osastopäällikkö, Outokumpu Oyj, Tornion tehtaat. Keskustelut elokuussa 2015.
8. HE 350/2014. 2015. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi nestemäisten polttoaineiden valmisteveron annetun lain muuttamisesta. Finlex. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2014/20140350>. Hakupäivä 14.12.2015.
9. Kärki, Anne 2015. Re: LNG-opinnäytetyö. Sähköpostiviesti 28.1.2016.
10. Maakaasukäsikirja. 2014. Suomen Kaasuyhdistys. Saatavissa: http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/maakaasun_kasikirja.pdf. Hakupäivä 14.12.2015.
11. Käyttöturvallisuustiedote, Raskas polttoöljy. 2015. Neste. Saatavissa: https://www.neste.fi/doc/kt/14358_fin.pdf. Hakupäivä: 14.12.2015.
12. AGA. Saatavissa: <http://www.aga.fi/fi/index.html>. Hakupäivä: 14.12.2015.
13. Kemin kaivoksen nestekaasujärjestelmän kuvaus. 2005. Tehokaasu Oy.
14. Öljy-,kaasu-, ja yhdistelmäpolttimet. Oilon. Saatavissa: http://www.oilon.com/uploadedFiles/Oilon/Materials/Oilon_3_FI.pdf. Hakupäivä 14.12.2015.
15. Nestekaasukuljetukset. Sisäinen dokumentti. Outokumpu Chrome Oy.

16. Hirvonen, Petri 2015. Re: IV-kanavat ja lämpökeskus. Sähköpostiviesti. 17.7.2015.
17. LNG satellite plants. Esite. Chart Industries Group D&S. Saatavissa:
http://files.chartindustries.com/LNG%20Satellite%20Plants_EN_500002_13JAN2014_web.pdf. Hakupäivä 14.12.2015
18. Nurmi, Jouko 2015. LNG-Satakunta Case 2. Sweco. Saatavissa:
http://issuu.com/prizztech/docs/lngsatakunta_case2_k_ytt_j_llene. Hakupäivä 15.12.2015.
19. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. 2010. VDI Heat Atlas second edition. Berlin: Springer.
20. Ylikunnari, Jukka 2014. T630103 Termodynamiikka 3 op. Opintojakson luennot syksyllä 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
21. Kalla, Esa 2015. Re: Kaivoksen propaanin ja öljyn käyttö LNG:lle. Sähköpostiviesti 12.6.2015.
22. Oregon LNG import terminal LNG vaporization study. 2007. CH-IV International. S.10. Saatavissa: <https://s3-us-west2.amazonaws.com/oregonlng/oregonlng/pdfs3/appendices/RR-13/appendices/appendix13c-5.pdf>. Hakupäivä 15.12.2015
23. Regasification, Overview. 2010. Exponent. Saatavissa:
http://www.exponent.com/LNG_regasification/#tab_overview. Hakupäivä 15.12.2015.
24. Valtanen Esko 2010. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.
25. Utriainen Juha 2015. Re: Eclipse AH. Sähköpostiviesti 18.6.2015.
26. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilateknikka (5. uudistettu painos). Opetushallitus, Helsinki: Edita Oy.
27. Puro, Kari 2015. Re: LNG muutos, polttimet. Sähköpostiviesti 11.8.2015.
28. Jauhola, Jyri 2015. Re: LNG-opinnäytetyöstä Kemin kaivokselle. Sähköpostiviesti 30.9.2015.

LIITTEET

Liite 1 Excel tiedosto: Polttoaineiden hinnat ja kulutukset, sekä toteutusehdotuksien investointi-kustannuslaskelmat

Liite 2 Eclipse paineenalennuslaitteisto, GAS systems, Finland Oy, Juha Utriainen

Liite 3 Oilon LNG-polttimet, Oilon, Kari Puro

Liite 4 Chart Ferox budjettitarjous, R1 (toteutusehdotukset 1 ja 2)

Liite 5 Chart Ferox budjettitarjous, R2 (toteutusehdotukset 3 ja 4)

Liite 6 Excel tiedosto: Chart Ferox OPEX-laskelmat