

Tero Holappa

MODHEAT-KUIVAIMEN TUOTEKEHITYS

Terästeollisuuden lietteille soveltuvan lapajärjestelmän suunnittelu

MODHEAT-KUIVAIMEN TUOTEKEHITYS

Terästeollisuuden lietteille soveltuvan lapajärjestelmän suunnittelu

Tero Holappa
Opinnäytetyö
Syksy 2018
Energiatekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Tero Holappa

Opinnäytetyön nimi: Kuivaimen tuotekehitys - Terästeollisuuden lietteille soveltuvan lapajärjestelmän suunnittelu

Työn ohjaaja: Timo Kiviahde

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2018

Sivumäärä: 30

Metalliteollisuudenprosesseissa muodostuvissa lietteissä on prosessin kannalta tärkeitä komponentteja, joiden talteen saamisella on merkittävää taloudellista potentiaalia. Työn tavoitteena oli suunnitella SFTec Oy:n modulaarisen ModHeat-kuivaimen lapajärjestelmää paremmin metalliteollisuuden lietteille sopiva lapajärjestelmä ja siten parantaa lietteenkuivauksen kannattavuutta.

Työssä on hyödynnetty 3d-mallinnusohjelma SolidWorksia, lujuuslaskentaa, yrityksen tekemiä tutkimuksia ja testejä sekä henkilölähteitä.

Työn lopputuotteena saatiin kehitettyä uusi lapajärjestelmä. Suunnittelun järjestelmän testiversiosta pyydettiin tarjoukset ja yrityksen käyttämään lapojen testipenkkiin suunniteltiin tarvittavat muutokset. Lisäksi määritettiin lapajärjestelmän toimivuutta kuvaavat testausmenetelmät.

Jatkokehityksessä tarkasteltiin lavan valmistuskustannusten pienentämistä materiaalivalinnoilla sarjatuotannon kannattavuuden parantamiseksi.

Työstä on poistettu osia tilaajan liikesalaisuuden turvaamiseksi. Kuvan 10 tilalle on vaihdettu havainnollistava esimerkkikuva.

Kuivaaminen, liete, kiertotalous, 3D-mallinnus, lujuusoppi

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
SISÄLLYS.....	4
1 JOHDANTO.....	5
2 ORGAANISEN JA EPÄORGAANISEN AINEEN KUIVAAMINEN.....	6
3 METALLITEOLLISUUDEN LIETTEIDEN KUIVAAMINEN.....	8
4 NYKYISET LAPARATKAISUT.....	10
4.1 Raappa.....	10
4.2 Kiilalapa.....	11
5 SIIRTOLAVAN VALINTA.....	13
5.1 Lapajärjestelmän mitoitus.....	13
5.2 Lavan muoto.....	13
5.3 Stoppari.....	14
5.4 Lapaväli ja sylinterin iskunpituus.....	15
5.5 Lapojen määrä.....	16
6 LUJUUSLASKENTA.....	19
6.1 Lujuusanalyysi.....	19
6.2 Simuloinnin tulokset.....	20
6.3 Niveltappiin kohdistuva leikkausvoima.....	21
6.4 Rangan nurjahduslujuus.....	23
7 VALMISTUS.....	25
8 KÄYTTÖTESTI.....	26
8.1 Testipenkin tarvitsemat muutokset.....	26
8.2 Testin suorittaminen.....	26
9 YHTEENVETO.....	28
LÄHTEET.....	29

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tuotekehitystyö. Työn tavoitteena on kehittää ModHeat-kuivaimessa käytettävää materiaalin siirtolapaa terästeollisuudessa muodostuvalle masuuni- ja konvertterilietteelle sopivaksi. Lavan tarkoitus on siirtää ja sekoittaa lietettä kuivumisen edistämiseksi. Aineen sekoittuminen takaa tasaisen koostumuksen ja kosteuden sekä tehostaa lietteen kuivumista. Kehitystyön lopputuotteen on tarkoitus kestää syötteen ja olosuhteiden rasitukset. Lisäksi sen tulee olla edullinen, yksinkertainen, helposti huollettavissa ja siirtää lietettä aiempaa versiota tehokkaammin.

Terminen kuivaaminen vaatii paljon energiaa, joten kaikki kuivumista edistävät toimet ovat tarpeen. Lisäksi on syytä hyödyntää mahdollisuuksien mukaan asiakkaan hukkalämpöjä tai bioenergiapohjaisia ratkaisuja. Materiaalien ja energian tehokkaampi hyödyntäminen sekä uudelleen käyttäminen on tärkeä osa kiertotaloutta, jolla vastataan tämän päivän ilmastohaasteisiin ja kiristyviin ympäristönormeihin. Työssä käsiteltävät masuuni- ja konvertterilietteet sisältävät korkeat pitoisuudet muun muassa raudanoksideja ja hiiltä, joita ei voida tällä hetkellä hyödyntää korkean kosteuspitoisuuden takia. Kuivaukseen tarvittava energia on tarkoitus saada terästeollisuuden kuonasta SFTec Oy:n kehittämällä RecHeat-lämmöntalteenottolaitteistolla. (1.)

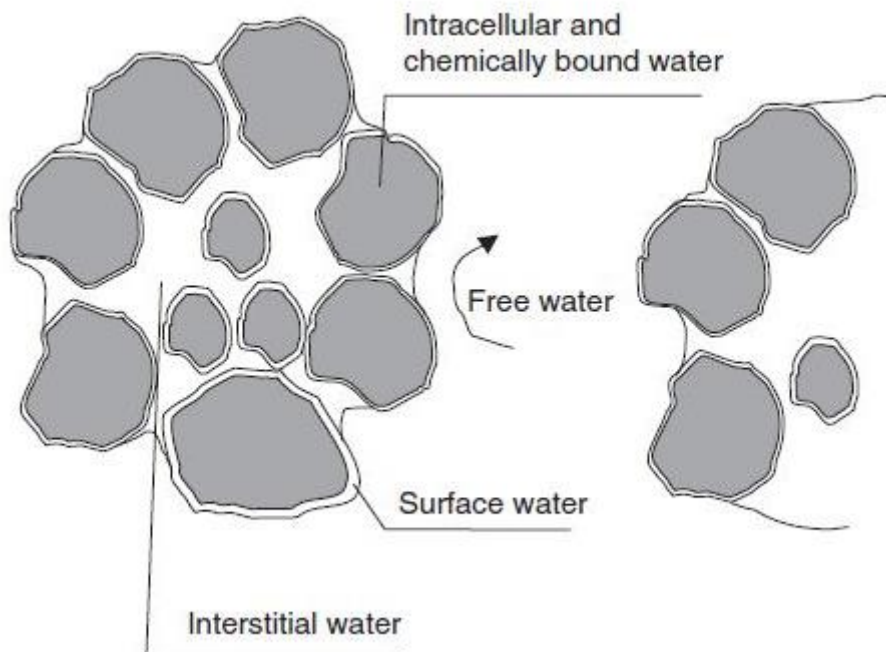
Työssä kilpailutettiin myös muihin tarkoituksiin kehitettyjä lapajärjestelmiä ja niiden osia. Niistä kuitenkin luovuttiin korkeiden ostohintojen vuoksi.

Kehitystehtävän pohjana käytetään yrityksen aiemmin käyttämiä ratkaisuja, asiantuntijoita sekä tekijän kokemusta yrityksen tuotteista, niiden toiminnasta sekä vastaavasta maataloudessa käytetystä järjestelmästä.

Työn tilaajana on lokakuussa 2013 perustettu SFTec Oy. Yrityksen toiminta perustuu teollisuuden sivuvirtojen jalostusasteen nostoon ja takaisinkierrätykseen kuivaamalla. Sivuvirtojen kuivaaminen tehostaa materiaalien uusiokäyttöä ja pienentää mahdollisia siirto- tai hävityskustannuksia.

2 ORGAANISEN JA EPÄORGAANISEN AINEEN KUIVAAMINEN

Materiaalien kuivumisprosessiin vaikuttaa onko kyseessä epäorgaaninen, kideaine vai orgaaninen aine, jolla on solurakenne. Syötteen pinnalla ja solujen tai kiteiden välissä oleva kosteus haihtuu verrattain helposti. Solunsisäinen kosteus on kuivumista hidastavan solukalvon takia vaikeampaa kuivata kuin ulkoinen kosteus- tai pinta-kosteus. Orgaaniseen aineeseen sitoutunutta kosteutta on esitelty kuvassa 1. (2, s. 914-930.)

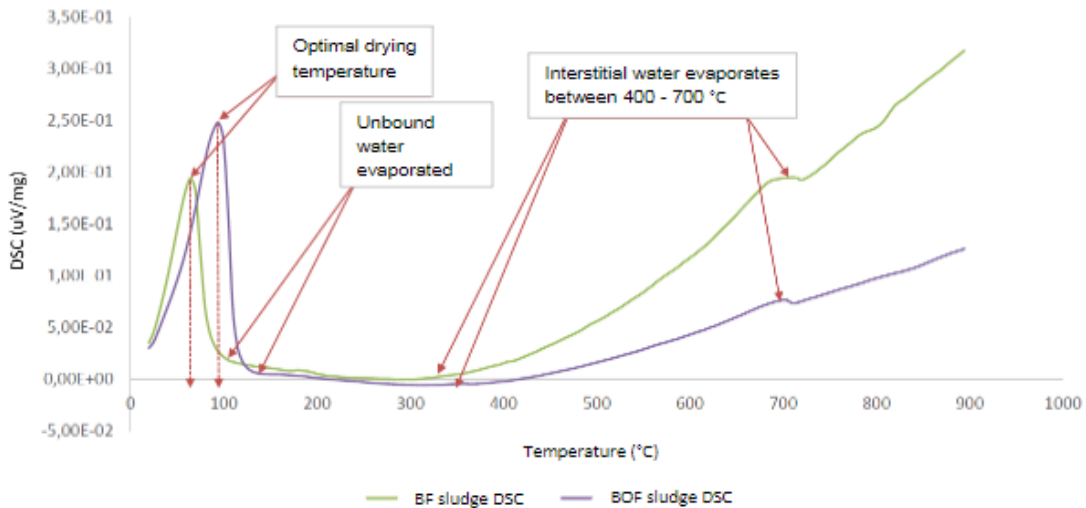


KUVA 1 Orgaanisessa solussa esiintyvä vesi (2, s. 916).

Lapajärjestelmä on tarkoitettu optimoimaan terästeollisuuden sivuvirtana muodostuvaan epäorgaanisten masuuni- ja konvertterilietteen siirtelyyn. Lietteiden lähtökosteus on noin 25 - 35 %. Molemmille lietteille ominaista on huomattavan suuri tiheys ja tahmaisuus. Lietteet koostuvat hienojakoisista metallioksidoista ja hiilestä. (1.)

Kiteeseen kemiallisesti sitoutunut kosteus on erittäin vaikeaa poistaa, sillä joistain sidoksista vesi haihtuu vasta alkuaineen höyrystyessä. Tämä vaatii huomattavan korkeita lämpötiloja ja samalla

menetettäisiin potentiaalisesti arvokkaita alkuaineita. Kuivattavan syötteen optimaalinen kuivauslämpötila määritetään termoanalyysi-menetelmiin kuuluvan differentiaalisen pyyhkäisykalometrian (DSC) avulla (kuva 2). DSC mittaa sekä näytteen että referenssin lämpötilan nostamiseksi tarvittavaa lämpömäärän muutosta. Näin saadaan selville muun muassa aineen sulamislämpötila ja -entalpia sekä faasimuutokset. (3.)

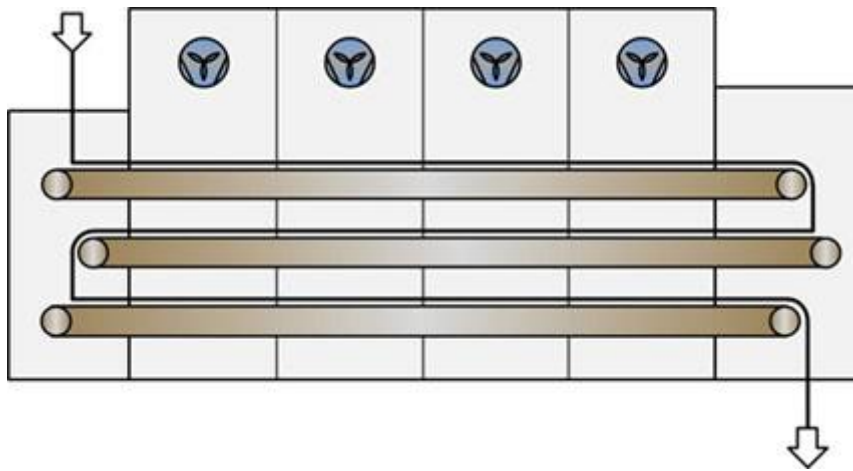


KUVA 2 Masuuni- ja konverterilietteen optimaalinen kuivauslämpö (1).

Laboratoriotestien perusteella voitiin todeta, ettei kiteeseen sitoutunutta tai kaikkea kiteiden välistä kosteutta ole tarve irrottaa. Näin ollen kuivauslämpötila voidaan pitää suhteellisen matalana ilman kuivausajan kohtuutonta kasvua, mikä helpottaa matalapotentiaalisen hukkaenergian käyttöä. (1.)

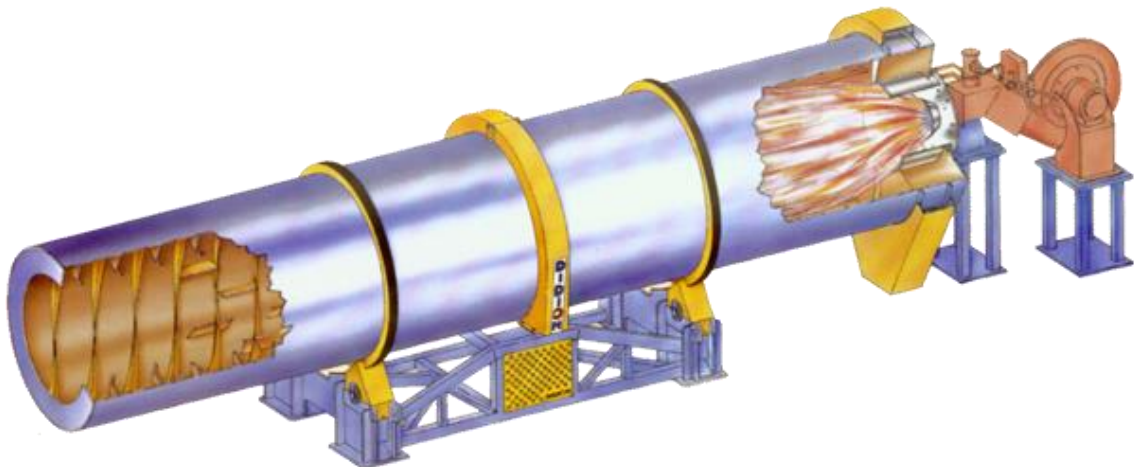
3 METALLITEOLLISUUDEN LIETTEIDEN KUIVAAMINEN

Suurimman haasteen kuivaukselle aiheuttaa lietteiden huomattava tiheys ja tahmaisuus. Perinteisissä nauha ja rumpukuivaimissa liete tarttuu nauhaan (kuva. 3) ja rumpun (kuva. 4) seinämiin. Lisäksi suuri massa vähentää kuivattavan syötteen määrää kuivaimessa. Modheat:issa vastaavia ongelmia ei ole, sillä lapojen kaksisuuntainen liike pyyhkii niitä puhtaaksi ja kiinteä alusta kestää painon hihnaa paremmin.



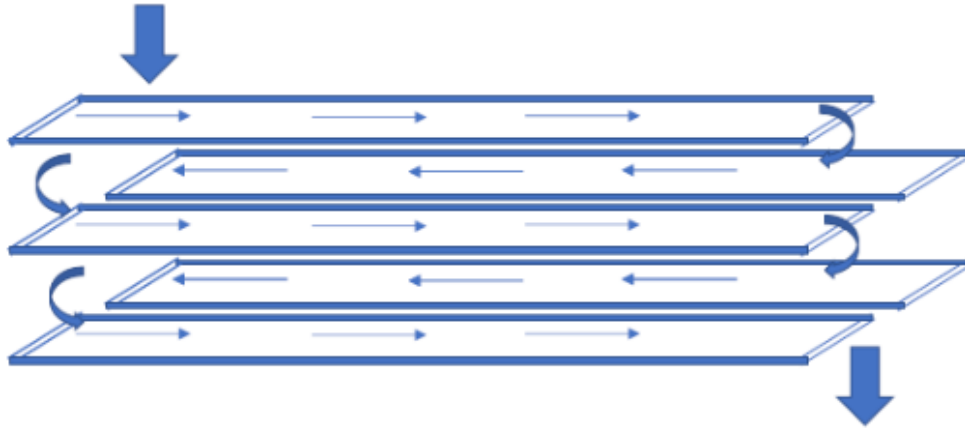
KUVA 3 Nauhakuivain (4).

Nauhakuivaimen kuivauspinta-alaa voidaan kasvattaa sijoittamalla useita tasoja päällekkäin. Näin laitteen vaatima asennuspinta-ala jää pieneksi. Rumpukuivaimen kuivauspinta-alan kasvattaminen tapahtuu joko suurentamalla rumpun halkaisijaa tai kasvattamalla rumpun pituutta. Rumpukuivaimen kuivauspinta-alan lisääminen kasvattaa samassa suhteessa asennuspinta-alaa.



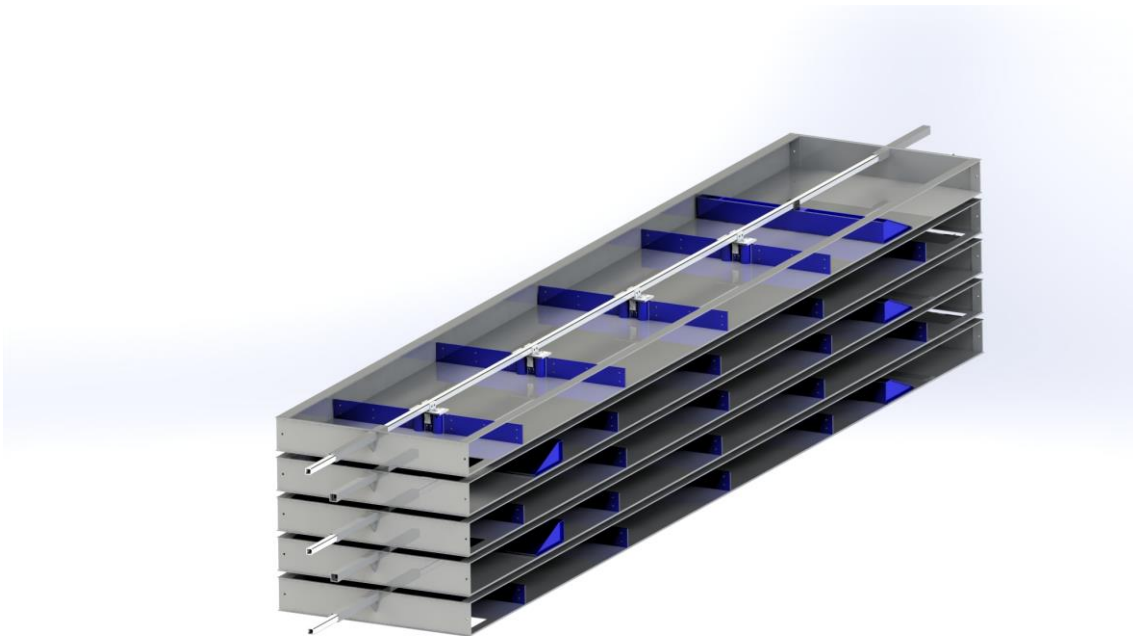
KUVA 4 Rumpukuivain (5).

Modheat-kuivaimessa ilma ja kuivattava syöte liikkuvat samaan suuntaan kuin nauhakuivaimessa, kuten kuvassa 5 voidaan havaita.



KUVA 5 ModHeat kuivaimen syötteen siirtoperiaate (1).

Kuvassa 6 nähdään materiaalin siirrostä vastaavan lapajärjestelmän perusperiaate. Hydraulikkasyylinteri työntää tankoa, jolloin lavat siirtävät syötettä kohti moduulin päätä, josta se tippuu seuraavan tason alkuun ja lopulta pois kuivaimesta.



KUVA 6 ModHeat kuivaimen lapajärjestelmän perusperiaate (6).

4 NYKYISET LAPARATKAISUT

Aiemmissa kuivainversioissa on käytetty raappoja ja kiilalapoja onnistuneesti (7). Kuivattava materiaali on vaihdellut metalliteollisuuden lietteistä hakkeeseen, selluun ja jopa merilevään. Kuivattavat materiaalit ovat poikenneet toisistaan merkittävästi tiheydeltään, koostumukseltaan sekä kosteustavoitteeltaan.

Kaikki edellä mainitut seikat vaikuttavat valittavaan laparatkaisuun. Käytetylle syötteelle optimaalinen lapa siirtää ja sekoittaa kuivattavaa ainetta paljastaen kosteaa pintaa ja tasaten lopputuotteen laatua.

4.1 Raappa

Raappa on varteen kiinnitetty nivelletty lapa. Lapa aukeaa edettäessä työstösuuntaan materiaalia siirtäen (kuva 7). Paluusuuntaan kääntyessään lapa sulkeutuu materiaalia hylkiväksi kiilaksi (kuva 8).



KUVA 7 Vanha raappamalli työntöasennossa

Yrityksessä on aiemmin hyödynnetty pieniä lapoja, joiden nivel on sijoitettu lavan päädyistä keskelle päin. Tällainen saranan sijoittaminen lyhentää kääntösädettä pienentämällä kääntöympyrän kaarta. Aiempien lapojen lyhyt mitta lisää sekä rinnakkain että peräkkäin asetettavien lapojen määrää. Tästä aiheutuu lisää kustannuksia komponenttien valmistuksessa, asennuksessa ja huollossa. Raappakonsepti on kuitenkin toimiva useilla eri materiaaleilla ja sitä on testattu aiemmissa pilottitesteissä tyydyttävästi metalliteollisuuden lietteillä.



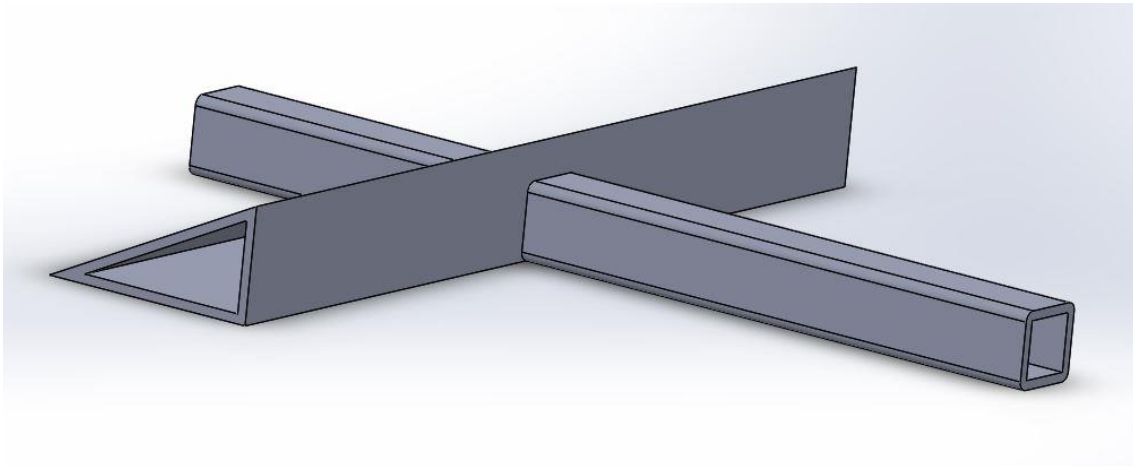
KUVA 8 Vanha raappamalli paluuasennossa

4.2 Kiilalapa

Kiilalavalla varustettuja tankopurkaimia on käytetty erityisesti jalostetuille puupolttoaineille, kuten hakkeelle ja pelletille. Se sopii kuitenkin myös lietteille, murskeille ja monille muille kohtuullisen painoisille puristumattomille syötteille.

Kiilalapa on sivuprofiililtaan suorakulmaisen kolmion mallinen kola, jonka lyhyt kateetti on työntösuuntaan päin (kuva 9). Edetessään kiilan lyhyt kateetti työntää syötettä eteenpäin ja palatessaan purkaimen hypotenuusataso sukeltaa materiaalipatjan alle. Kiilamainen profiili helpottaa materiaalin ylivirtausta ja mahdollistaa näin syötteen etenemisen. Tankopurkaimissa esiintyy aina pientä takaisinvirtausta. Tähän vaikuttaa erityisesti kiilalavan kulman jyrkkyys.

Materiaalin paluuliikettä voidaan vähentää entisestään asentamalla pohjaan kiinteitä kynnyksiä. Myös kynnykset ovat kiilamaisia ja asettuvat samoin päin virtaussuuntaan nähden kuin kola. Kynnykset sijoittuvat työnnön ääripäihin, jotta kola pystyy työntämään syötteen kynnyksen kiilan yli kateetin taakse. Kaikki materiaali ei kuitenkaan voi ylittää kynnystä, sillä muuten myös kola kiilautuisi ylös. (8.)



KUVA 9 Kiilalapa

5 SIIRTOLAVAN VALINTA

Opinnäytetyössä päädyttiin syötteen tarttuvuuden takia kehittämään raappalapaa. Kääntyessään raappa pyyhkii itseään puhtaaksi kuivattavaa syötettä vasten. Näin raappaan ei voi tarttua liikaa syötettä. Kuivattava liete myös sekoittuu tehokkaammin raapalla. Lisäksi raapan toimintaperiaate oli havaittu toimivaksi syötteelle aiemmassa pilottitestissä. Lopulliseen ratkaisuun kuitenkin lisättiin yksi kiilalapa tason siirtosuunnassa ensimmäiseksi lavaksi, jotta syöte ei pakkautuisi moduulin alkupäähän tippuessaan tasolta toiselle.

5.1 Lapajärjestelmän mitoitus

Lapajärjestelmän mitoitus alkaa lavan pituuden valinnasta. Lavan pituus määräytyy moduulin leveyden ja voimaa välittävien rankojen määrän perusteella. Ylimääräisten komponenttien käyttö ei ole tehokasta tai tarkoituksenmukaista. Käytetyn moduulin leveys on kaksi metriä. Rangan leveys on 60 mm ja vapaata tilaa lapa-kojen kärkiin jää vähintään 30 mm. Kahdella rangalla toteutetun järjestelmän lavan pituus ratkaistiin kaavalla 1:

$$l_{Lapa} = \frac{w_{Moduuli} - n_{ranka} * w_{ranka} - n_{rako} * l_{pelivara}}{n_{lapa}} \quad \text{KAAVA1}$$
$$\frac{2000 \text{ mm} - 2 * 60 \text{ mm} - 3 * 30 \text{ mm}}{4} = 447,5 \text{ mm} \approx 445 \text{ mm}$$

Lavan pituudeksi saatiin 447,5 mm. Tuotantoteknisistä syistä lavan mitta pyöristettiin 445 millimetriin.

5.2 Lavan muoto

Profiilia valittaessa pitää huomioida lapaan kohdistuvat voimat, tarvittava korkeus, materiaalin siirron tehostaminen, valmistamisen helppous sekä sovelluksen tuomana erityispiirteenä syötteen sekoittaminen.

Lavan kääntyminen paluusuuntaan päin siirtää lietettä sivulle.

Lavan pää on viistetty 45°:n kulmaan (kuva 10), jolloin vetosuunnassa pinnalla oleva liete ohittaa lavan kärjen ennen pohjalla olevaa lietettä. Näin estetään pinnasta kuivien ja sisältä kosteiden ka-sojen syntyminen. Kuivemman pinta-materiaalin hautautuminen kosteamman sekaan estää pölyä-mistä ja takaa tasalaatuisen lopputuotteen. Leikkaus myös suojaa lapaa ylikuormitukselta, sillä yli-määräinen syöte pääsee ohittamaan lavan ja näin ollen hallitsematonta kuormitusta ei voi syntyä.



KUVA 10 Esimerkkikuva lavan siipi edestä

5.3 Stoppari

Myös stopparilla on useita funktioita. Stopparin tehtävä on rajata lavan liikkeit molemmissa suun-nissa, nopeuttaa kääntymistä, jäykistää lavan siipeä ja olla kiinnityspisteenä saranan holkille.

Stopparin muoto nopeuttaa merkittävästi kääntymistä. Aiemmissa malleissa lapa oli suoraan hol-kissa kiinni. Tällöin lavan kääntymiseen tarvittava sylinterin iskunpituus on sama kuin lavan ympy-räsektorin pituus.

Vanhan lavan kääntymiseen tarvittavaa iskunpituutta vastaava kaarenpituus laskettiin kaavalla 2 (9, s.19):

$$b_{\text{vanha lapa}} = \frac{\alpha}{180^\circ} * \pi * r = \frac{\alpha}{180^\circ} * \pi * l_{\text{vanha lapa}} \quad \text{KAAVA 2}$$

$$\frac{72^\circ}{180^\circ} * \pi * 30 \text{ cm} = 37,70 \text{ cm}$$

Uuden lavan kääntymiseen tarvittavaa iskupituutta vastaava kaarenpituus laskettiin sijoittamalla kaavaan 2 uuden lavan merkitsevä arvo ja kulman α tilalle uudessa lavassa käytettävä kulma:

$$\frac{\alpha}{180^\circ} * \pi * r = 19,45 \text{ cm}$$

KAAVA 2

Syötteen siirtelyyn hyödyksi saatu sylinterinmitta laskettiin vanhan ja uuden lavan kääntösäteiden erotuksena:

$$\Delta b = b_{\text{Vanha lapa}} - b_{\text{Uusi lapa}}$$

KAAVA 3

$$37,70 \text{ cm} - 19,45 \text{ cm} = 18,25 \text{ cm}$$

Lavan lyhyempi kääntömatka tehostaa materiaalin siirtoa ja parantaa hydraulikkakoneikon hyötysuhdetta, koska suurempi osa hydraulikkakoneikon tekemästä työstä menee materiaalin siirtoon.

Stopparin kiinnityspinnan pituus lyhentää lavan siiven vapaata, tukematonta mitta. Tämä lyhennyt jänneväli jäykistää lapa ja auttaa jakamaan lavan siipeen kohdistuvaa voimaa stopparin kautta rankaan.

5.4 Lapaväli ja sylinterin iskunpituus

Raappalavan jakoväli on useissa olemassa olevissa järjestelmissä puolet sylinterin iskunpituudesta. Lapa kuitenkin on työnnön alkuvaiheessa taitoksissa, jolloin osa siirrettävästä syötteestä jää seuraavalle lavalle. Näin ollen syötekasa siirtyy vain puolen iskunpituuden verran. (10.)

Jos lapavälin ja iskunpituuden suhdetta pienennetään, lapa tulee kauemmas kasan taakse ja ehtii näin aueta ennen kasaa. Käytännössä tästä optimista joudutaan ja kannattaakin joustaa. Mikäli kasat liikkuisivat täysin, keskittyisi kuivuminen pintakerrokseen, joka eristää kosteutta ja lisää pölyämistä. Lisäksi materiaalikasojen "leikkaantuminen" sekoittaa syötettä ja lisääntynyt lapojen määrä jakaa painon tehokkaammin tasolle sekä tasaa yksittäisen lavan kuormitusta.

Sylinterin työpituudella ja lapojen etäisyyden suhteella on ratkaiseva merkitys raappalapajärjestelmän toimivuuteen. Iskun pitää olla riittävän pitkä, jotta lapa ehtii kääntyä ja siirtää materiaalia. Mitä vähemmän kääntöjä, sitä vähemmän suhteessa on kääntymiseen käytettyä sylinteriniskunpituutta.

Sylinterin iskunpituus vaikuttaa myös paluusuuntaan. Palaava lapa lävistää takanaan olevan kasan, jolloin syöte siirtyy pois päin rangasta. Jos iskun pituus on liian lyhyt, ei lapa ehdi siirtää takanaan olevaa syötekasaa sivuun. Riittämättömän hylkäysajan takia lavan selkäpuolelle jäänyt syöte jää seuraavalle lavalle.

Iskunpituudessa on myös huomioitava, että takaisin lähtöasemiin tullut lapa on liikkeen alussa paluukulmassa eikä työntökulmassa 90° . Tämän takia lapojen välinen etäisyyden tulisi olla alle 50 % iskunpituudesta. Iskunpituudeksi valittiin kaksi metriä ja kertoimen k arvoksi 0,48. Lapojen asennusväli laskettiin kaavalla 4:

$$d_{Lapa} = l_{Isku} * k \quad \text{KAAVA 4}$$

$$2000 \text{ mm} * 0,48 = 960 \text{ mm}$$

Lapojen alustavaksi asennusväliksi saatiin 960 millimetriä. Arvo voi vielä muuttua rankaan tarvittavien lapojen määrän takia.

5.5 Lapojen määrä

Yhden rangan tarvitsemien lapaparien määrä ratkaistaan moduulin- ja pudotusaukon pituuden sekä sylinterin iskupituuden, lapavälin ja perälanan leveyden avulla. Moduulin pituus on 8000 millimetriä, pudotusaukon pituus on 500 millimetriä ja perälanan leveys on 117 millimetriä.

Lapojen määrää mitoitettaessa on huomioitava sylinterin iskupituus, jotta lavat eivät osu moduulin pätyyn. Lapojen ei ole myöskään tarkoituksenmukaista roikkua pudotusaukossa. Tehokkaan materiaalin siirron takia on kuitenkin päästävä mahdollisimman lähelle pudotusaukon reunaan. Näin ollen molempiin päihin jätettiin 50 mm:ä tyhjää tilaa. Lisäksi huomioitiin siirtosuunnassa ensimmäisenä oleva perälana, joka sisältyy laskettavien lapojen määrään. Seuraavaksi ratkaistiin ensimmäisen ja viimeisen lavan välinen etäisyys:

$$l_{Asennuspituus} = l_{Moduuli} - l_{Isku} - l_{Aukko} - l_{Kiilalapa} - 2 * l_{Tila\ p\aa\ dyss\aa} \quad \text{KAAVA 5}$$

$$8000 \text{ mm} - 2000 \text{ mm} - 500 \text{ mm} - 117 \text{ mm} - 2 * 50 \text{ mm} = 5283 \text{ mm}$$

Siirtolapojen asennusmitta on määritetty lavan etuosasta. Näin ollen asennusväli ja lapojen etäisyyden osamääränä saadaan lapojen välien määrä. Välien määrästä saadaan peräkkäin olevien

lapojen kappalemäärä lisäämällä siihen yksi. Tässä tapauksessa lisätty lapa on ajateltu rangassa ensimmäisenä olevaksi kiilalavaksi. Ratkaistiin tarvittava lapojen määrä:

$$n_{Lavat\ sarjassa} = \frac{l_{Asennusväli}}{d_{Lapa}} + n_{Kiilalapa} \quad \text{KAAVA 6}$$

$$\frac{5293\text{ mm}}{960\text{ mm}} + 1 = 6,50 \approx 7$$

Koska lapojen määrän täytyy olla tasaluku, pyöristettiin arvo ylöspäin. Lapamäärän muututtua muuttui myös lapaväli. Ratkaistiin uusi lapaväli jakamalla asennusväli uudella lapamäärällä.

$$d_{Lapa} = \frac{l_{Asennusväli}}{n_{Lavat\ sarjassa} - 1} \quad \text{KAAVA 7}$$

$$\frac{5293\text{ mm}}{7 - 1} = 882,17\text{ mm}$$

Syötteen pakkautumista alkupäähän ehkäistiin pienentämällä kiilalavan ja ensimmäisen raapan välistä etäisyyttä. Raappa pääsee näin paremmin syötekasan taakse ja poistaa sen tehokkaammin. Raappojen välinen etäisyys pyöristettiin 900 millimetriin ja laskettiin kiilalavan ja raapan välinen etäisyys:

$$d_{Kiilalapa-Raappa} = l_{Asennusväli} - (n_{Lavat\ sarjassa} - 2) * d_{Lapa} \quad \text{KAAVA 8}$$

$$5293\text{ mm} - (7 - 2) * 900\text{ mm} = 793\text{ mm}$$

Kiilalavan ja raapan etupintojen etäisyydeksi saatiin 793 millimetriä. Tämä ei ole käytännöllinen asennusmitta, joten mittapiirroksissa käytettiin etäisyyttä rangon päädystä.

Lopuksi laskettiin vielä yhteen rankaan ja yhteen moduuliin tarvittavien lapojen määrät:

$$n_{Lapaa\ rangassa} = n_{Lavat\ sarjassa} * n_{Lavat\ rinnan\ rangassa} \quad \text{KAAVA 9}$$

$$7 * 2 = 14$$

Moduulissa olevien lapojen määrä saatiin kertomalla rangassa olevien lapojen määrä rankojen lukumäärällä:

$$n_{\text{Lapaa modulissa}} = n_{\text{lapaa rangassa}} * n_{\text{rangat}}$$

KAAVA 10

$$14 * 2 = 28$$

Kaksimetrillä sylinterin iskupituudella moduuliin tuli 24 raappaa ja 4 kiilalapaa.

6 LUJUUSLASKENTA

Komponenttien kestävyyttä tarkasteltiin sekä 3D-mallinnusohjelma SolidWorksin FEM-analyysillä, että käsin laskien. SolidWorksilla arvioitiin lavan kestävyyttä kokonaisuudessaan.

Vaikka mitoituksessa käytetään 2000 mm:n sylinterin iskunpituutta, toteutettavassa kuivaimessa iskunpituus vaihtelee 1000-2500 millimetrin välillä. Tämän takia lavan lujuusanalyysi tehdään pisimmän iskunpituuden lapamäärällä 24, jolloin yksittäisen lavan rasitus on suurin.

Käsin suoritetulla lujuuslaskennalla tutkittiin nivelpisteen leikkausvoimaa ääritilanteissa sekä määritettiin rangan nurjahduslujuus. Rangan nurjahduslujuuden perusteella rajoitetaan hydraulikan työntövoima. Näin komponentteihin ei voi kohdistua liiallista rasitusta.

6.1 Lujuusanalyysi

Lapakokoonpano avattiin SolidWorksissa ja sieltä valittiin Simulation-välilehdeltä Study Advisor ja New Study. Kuormitusta tarkasteltiin lavan työntöasennossa, joten tarkastelutyyppiä valittiin Static. Seuraavaksi komponentit yhdistettiin Rigid connection -komennolla ja syötettiin lavan tukipinta. Tukipinta valittiin stopparin työntöä rajoittava reuna. Pinnalle annettiin liikevaraa voiman suuntaa 0,25 millimetriä eli puolet saranan välyksestä. Korkeussuuntaan liikevaraa asetettiin 5 millimetriä, eli holkin ja saranan korkeussuuntaisen välyksen verran.

Kuormituksen ajateltiin työntöä lopussa kohdistuvan koko lavan alalle, joten voiman tyyppiä valittiin paine Pressure-komennolla. Lapaan kohdistuva voima arvioitiin tasolla olevan noin 2500 kg:n massan ja 500 kg:n varmuuslisän avulla 3000 kg:a. (7.) Massa muutettiin voimaksi kertomalla se maan vetovoimakiihtyvyydellä g:

$$F = m * g \quad \text{KAAVA 11}$$

$$3000 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 29\,430 \text{ N}$$

Lapaan kohdistuva voima laskettiin jakamalla tasolle kohdistuva voima lapojen lukumäärällä:

$$F_{Lapa} = \frac{F}{n_{lapa}} \quad \text{KAAVA 12}$$

$$\frac{29\,430 \text{ N}}{24} = 1226,25 \text{ N}$$

Kun yhteen lapaan kohdistuva voima tiedettiin, laskettiin lavan pintaan kohdistuva paine. Paineen laskemiseksi tulee määrittää lavan pinta-ala, joka saatiin helposti SolidWorksista Measure -toiminnolla.

$$P_{Lapa} = \frac{F_{Lapa}}{A_{Lapa}}$$

KAAVA 13

$$\frac{1226,25 \text{ N}}{0,29 \text{ m}^2} = 4228,45 \text{ Pa}$$

Lavan materiaaliksi valittiin S235JR Apply material -valikosta Din Materials -välilehdeltä. Todellisuudessa materiaalina käytetään joko galvanoitua S235 rakenneterästä tai ferriittistä ruostumatonta terästä. Nämä ovat kuitenkin lujuusominaisuuksiltaan vertailukelpoisia.

Lopuksi luotiin tarkasteluverkko verkon koolla 5 mm:ä. Verkon koko oli kompromissi tarkastelun tarkkuuden ja tietokoneen laskentatehon välillä. Karkea verkko antaa epätarkemman tuloksen, kun taas pieni vaatii tietokoneelta huomattavan paljon laskentatehoa ja aikaa. Tarkempaan tarkasteluun ei nähty tarvetta, sillä simulaatio on kaikesta hyödyllisyydestään huolimatta vain suuntaa-antava.

Lopuksi suoritettiin analyysi Run This Study -komennolla.

6.2 Simuloinnin tulokset

Lapaan kohdistuvat rasitukset eivät ole merkittäviä, sillä ne jäivät huomattavasti myötörajan alle. Suurin rasitus kohdistui odotetusti stopparin liikettä rajoittavaan pintaan. Stoppariin kohdistuva rasitus jää selkeästi alle materiaalin myötörajan.

SolidWorks simuloi jännityksen lisäksi kuormituksen aiheuttaman muodonmuutoksen. Normaalissa olosuhteissa lapaan kohdistuvien voimien ei pitäisi aiheuttaa ongelmia.

Lavan muodonmuutos ei ole merkittävä, varsinkin kun huomioidaan yliarvioitu kuormitusvoima. Näin ollen tarkastelussa on riittävä varmuuskerroin. Syötteen huomattavasta tiheydestä johtuen suuren varmuuskertoimen käyttäminen on kuitenkin perusteltua.

6.3 Niveltappiin kohdistuva leikkausvoima

Niveltappiin kohdistuvaa jännitystä tarkastellaan ääritilanteessa, jossa jokin vierasesine kohdistaa koko tason voiman saranaan. Jotta leikkausvoima voidaan laskea, täytyy lapaan kohdistuvan voiman X- ja Y-suuntaiset voimat selvittää. Positiivisia suuntia ovat X-akselilla vasemmalta oikealle ja Y-akselilla alhaalta ylöspäin. Lapa tarkastellaan poikkileikkauksen suunnasta vasemmalta sivulta päin työntösuunnan ollessa oikealta vasemmalle. X-akseli leikkaa lavan kanttauksen kohdalta. Voimana F_R toimii edellisessä kohdassa määritetty 29 430 Newtonin suuruinen voima.

Lavan yläosan kohtisuora komponentti F_A ja lavan alaosan kohtisuora komponentti F_B laskettiin kaavalla 14:

$$F_A = F_R * \sin \alpha \quad \text{KAAVA 14}$$

$$F_B = F_R * \sin \alpha \quad \text{KAAVA 14}$$

Voiman F_A X ja Y-suuntaiset komponentit F_{AX} ja F_{AY} laskettiin kaavoilla 14 ja 15:

$$F_{AX} = F_A * \sin \alpha \quad \text{KAAVA 14}$$

$$F_{AY} = F_A * \cos \alpha \quad \text{KAAVA 15}$$

Voiman F_B X ja Y-suuntaiset komponentit F_{BX} ja F_{BY} laskettiin kaavoilla 14 ja 15:

$$F_{BX} = F_B * \sin \alpha \quad \text{KAAVA 14}$$

$$F_{BY} = F_B * \cos \alpha \quad \text{KAAVA 15}$$

Voima F_{BY} sai negatiivisen arvon, koska sen suunta on ylhäältä alaspäin, joka oli määritetty negatiiviseksi suunnaksi.

Voimien F_A ja F_B X-suuntainen resultantti laskettiin kaavalla 16:

$$F_X = F_{AX} + F_{BX}$$

KAAVA 16

Voimien F_A ja F_B Y-suuntainen resultantti laskettiin kaavalla 17:

$$F_Y = F_{AY} + F_{BY}$$

KAAVA 17

Kun voimat F_X ja F_Y tiedettiin, muodostettiin niiden avulla suorakulmainen kolmio. Tästä kolmiosta ratkaistiin Pythagoraan lauseella hypotenuusan suuntainen voima F :

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

KAAVA 18

$$F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} = 13\,329,24\, N$$

Niveltapin poikkipinta-alan suuntainen leikkausvoima Q työntöasennossa laskettiin voiman F ja liikevaran kulman kosinin tulona:

$$Q = F * \cos \alpha$$

KAAVA 19

$$13\,329,24\, N * \cos 1,91 = 13\,321,84\, N$$

Pyöreän tapin halkaisija oli 10 mm:ä. Tapin poikkipinta-ala laskettiin ympyrän pinta-alan kaavalla (9, s. 18):

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

KAAVA 20

$$\frac{\pi * 10^2\, mm}{4} = 78,54\, mm^2$$

Leikkausjännitys τ laskettiin jakamalla leikkausvoima Q tapin poikkipinta-alalla A (9, s. 140):

$$\tau = \frac{Q}{A}$$

KAAVA 21

$$\frac{13\,321,84\, N}{78,54\, mm^2} = 169,62\, MPa$$

Kriittinen leikkausjännitys laskettiin kertomalla M10- pultin vetomurtolujuuden arvo yli 100 °C lämpötilassa leikkausmurtolujuuden kertoimen 0,58 avulla (11, s. 798, 277):

$$\tau_{m+100c} = \sigma_m * 0,58$$

KAAVA 22

$$590 \text{ MPa} * 0,58 = 342,20 \text{ MPa}$$

Syntyvää leikkausjännitystä verrattiin leikkausjännityksen kriittiseen arvoon:

$$342,20 \text{ MPa} > 169,62 \text{ MPa}$$

Pultin leikkausjännityksen raja on merkittävästi suurempi kuin niveleen kohdistuva leikkausjännitys. Varmuuskerroin V laskettiin jakamalla pultin leikkausjännityksen kesto nivelen leikkausjännityksellä:

$$V = \frac{\tau_m}{\tau}$$

KAAVA 23

$$\frac{342,20 \text{ MPa}}{169,62 \text{ MPa}} = 2,02$$

Saranana toimivan pultin varmuuskerroin on ääriolosuhteissakin riittävä. Varsinaista tarvetta näin suurelle kertoimelle ei ole, mutta saranan halkaisija oli päätetty jo stopparin halkkia mitoittaessa. Komponentin ylimitoitus ei myöskään aiheuta turhia kustannuksia.

6.4 Rangan nurjahduslujuus

Pitkänä kappaleena ranka on moduulin kriittisin komponentti. Rangan kriittistä nurjahduslujuutta arvioitiin alustavasti aiemmissä järjestelmissä käytetyn rangan mittojen pohjalta. Rangan kriittisen nurjahduslujuuden avulla säädetään hydraulikkakoneikon paineenrajoitinventtiiliä siten, ettei komponentteihin voi kohdistua liiallista rasitusta. Koska ranka oli sivuttais- ja korkeussuunnassa tuettu molemmista päistä, nurjahduspituuden kertoimena käytettiin 0,7:ää (11, s. 274). Rangan kriittinen nurjahdusvoima laskettiin kaavalla 24:

$$F_n = \frac{\pi^2 * E * I}{(0,7 * l_n)^2}$$

KAAVA 24

$$\frac{\pi^2 * 206\,000 \text{ MPa} * 436\,000 \text{ mm}^4}{(0,7 * 8000 \text{ mm})^2} = 28\,266,85 \text{ N}$$

Kriittinen nurjahdusvoima kerrottiin tasolla olevien rankojen määrällä:

$$F_{n \text{ moduuli}} = n_{\text{Ranka}} * F_n$$

KAAVA 25

$$2 * 28\,266,85 \text{ N} = 56\,533,70 \text{ N}$$

Rankoihin kohdistuvaa voimaa verrattiin rankojen kriittiseen nurjahdusvoimaan:

$$29\,430,00 \text{ N} < 56\,533,70 \text{ N}$$

Nurjahdusvarmuus laskettiin jakamalla kriittinen nurjahdusvoima rankoihin kohdistuvalla voimalla:

$$n = \frac{F_{n \text{ Moduuli}}}{F_n}$$

$$\frac{56\,533,70 \text{ N}}{29\,430,00 \text{ N}} = 1,92$$

Varmuuskerroin asettui teräkselle tyypilliselle varmuusketoimenvaihteluvälille 1,5-3,5 (11, s.275).

7 VALMISTUS

Lapa päätettiin valmistaa joko galvanoidusta S235-teräksestä tai ferriittisestä ruostumattomasta teräksestä.

Stoppari valmistettiin laserleikkaamalla 5 mm:ä vahvasta levystä. Holkki valmistettiin leikkaamalla 20 mm:ä paksusta pyörätangosta 15 mm:ä pitkä pala, jonka keskelle porattiin 10,5 mm:n reikä. Lavan osat kiinnitettiin toisiinsa hitsaamalla.

Haarukkasaranan palat leikattiin 8 mm:ä vahvasta levystä laser-leikkurilla. Saranapalan reikä leikattiin muotoon leikkaamisen yhteydessä.

Ranka valmistettiin hitsaamalla kahdesta 60 x 60 x 4 mm:sestä neliöputkesta. Putkien liitoskohtaan hitsattiin pienempi putki sisäholkiksi jakamaan liitoskohtaan kohdistuvaa rasitusta. Lopuksi hitsattiin saranapalat kiinni rankaan.

8 KÄYTTÖTESTI

8.1 Testipenkin tarvitsemat muutokset

Suunniteltu lapa valmistetaan tarjouspyyntöjen perusteella. Mallin toimivuuden arvioimiseksi ja mahdollisten ongelmakohtien havaitsemiseksi tilattiin yrityksessä olevaan testipenkkiin lavat ja sarranoitu ranka. Penkin leveys oli riittävä yhdelle rangalle, jossa on lapa molemmin puolin. Penkin lyhydestä johtuen rankaan ei asenneta ollenkaan peräkkäisiä lappoja.

Testipenkin poisto-aukkoa levitetään koko tason levyiseksi ja vanha lapajärjestelmä poistetaan kokonaan. Päätylevyjien rangon ohjausholkit siirretään uuden rangon suuntaisiksi ja vanhoja rankoja käytetään uuden rangon jatkeena sekä levennetyn pudotusaukon jäykisteenä. Myös hydrauliiikan venttiilin ohjauksesta vastaavat kytkimet siirretään muuttuneen rankakonfiguraation takia.

Vanhojen rankojen osia hyödyntämällä saadaan testipenkin sylinterin iskunpituutta kasvatettua, sillä vanhojen rankojen asettelu lyhensi sylinterin hyödynnettävän iskunpituuden metristä 55 senttimetriin. Vaikka nykyinen iskupituus on todennäköisesti todellista tilannetta lyhyempi, parantaa se tulosten suuntaa-antavuutta merkittävästi.

Rangan, moduulin muutosten ja kytkimien siirron jälkeen pultataan lavat rankaan. Lopuksi tarkastettiin käsin lappojen liikkuvuus, kytkinten toiminta sekä rangon ja pohjan riittävä välys.

8.2 Testin suorittaminen

Varsinaisen testin suorittaminen jakautuu kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaihe suoritetaan tyhjällä penkillä, toisessa vaiheessa syötetään testipenkkiin testimateriaalia. Ensimmäisenä tarkastellaan lappojen asentamisen helppoutta ja mahdollisia ongelmakohtia. Tarpeen tullen suunnitelmaan, toteutetaan ja kirjataan tehdyt muutokset sekä muut kehityskohteet.

Asennusvaiheen jälkeen tarkastellaan lapojen liikkuvuutta. Ensin lapojen toiminta varmistetaan käsin kääntelemällä. Mahdollisiin ongelmiin puututaan. Kun lapojen liikkuvuus on varmistettu, käytetään rankaa hydraulikkakoneikolla. Lapojen, rangon sekä sylinterin työsuunnan kääntymisestä vastaavien kytkimien toiminta tarkistetaan.

Kun testipenkki on todettu toimivaksi, syötetään siihen testimateriaalia. Materiaalina käytetään ensin haketta ja puhdistuksen jälkeen hiekkaa. Molemmilla syötteillä arvioidaan työntövaiheessa materiaalin siirron tehokkuutta. Paluusuuntaan tarkastellaan takana olevan materiaalipatjan hylkäyskykyä. Hylkäys kuvaa takana olevan materiaalin sivulle siirtymisen suhdetta takaisinvirtaukseen. Koska järjestelmässä ei ole peräkkäisiä lapoja, simuloidaan taaemman lavan kuljettamaa kasaa materiaalin käsisyötöllä.

Molemmilla syötteillä mitataan minuutin aikana siirtämä tilavuus. Tarvittavat välineet ovat sekuntikello, 5 l mitta-astia, keräysastia, syöteastia sekä lapio. Ennen mittausta ajetaan testipenkkiin valmiiksi materiaali, jolloin varsinainen testi tapahtuu tasapainotilassa. Mittauksen alussa ranka on ajettu työntövaiheen alkuun, lavat hylkäysasennossa. Minuutin ajon jälkeen mitataan poistoaukosta tippuneen materiaalin tilavuus.

9 YHTEENVETO

Lavan toimintaa voidaan kunnolla arvioida vasta käyttötestin jälkeen. Jatkokehitystä suunniteltaessa on arvioitava lavan muotoilun ja stopparin tuomia hyötyjä sekä asennettavuuden helppoutta ja toimintaa.

Jos kokonaisuus havaitaan hyväksi, selvitetään onko työstövaiheita mahdollista vähentää. Yksittäisissä komponenteissa tämä ei aiheuta merkittäviä kustannuksia, mutta massatuotannossa kaikki työstövaiheet pienentävät voittomarginaalia.

Lavan siiven muodon valmistaminen vaatii useampia työvaiheita. Lavan siiven jatkokehityksessä voitaisiin tarkastella tehokkaampaa standardikomponenttien käyttöä, jolloin tarvittavien työstövaiheiden määrä vähenisi.

Lisäksi stopparin mukanaan tuomaa hyötyä on arvioitava. Jos kääntöajan lyheneminen ja sitä kautta kasvanut materiaalin siirtonopeus ei kasva riittävästi suhteessa hintaan, on komponentti syytä karsia tai kehittää vaihtoehtoinen osa tilalle.

Holkki joudutaan mittojensa takia koneistamaan, joten erityisesti sen jatkokehitys on tärkeää. Niveltapin halkaisijaa ja stopparia muuttamalla, voitaisiin holkki valmistaa suoraan ainesputkesta leikkaamalla. Tämä voi kuitenkin aiheuttaa lisäkustannuksia mahdollisesti kalliimman niveltapin kautta.

Merkittävin hyöty kuivaimelle saataisiin laparatkaisusta riippumatta pidentämällä nykyistä sylinterin iskunpituutta. Tämä kasvattaisi lavan työasennossa viettämää aikaa ja tehostaisi materiaalin ohivirtausta paluusuunnassa. Iskunpituutta on rajallisesti mahdollista kasvattaa nykyisen pohjapiirustuksen puitteissa. Merkittävästi pidemmät sylinterit vaatisivat kuitenkin erillisen hydraulikka- ja automaatiokontin. Erillinen hydraulikka- ja automaatiokontti pidentäisi moduulien mittaa ja kasvattaisi näin myös kuivauspinta-alaa.

Yli kaksi metriä pitkien sylinterin pitäisi painavilla materiaaleilla olla teleskooppisylinterejä, jäykemmän putkirakenteensa takia. Aiempaa kokemusta teleskooppisylinterien toiminnasta kuumassa ja pölyisessä ympäristössä ei ole, joten sitä ei seuraavassa kuivain versiossa tulla käyttämään.

LÄHTEET

1. Leinonen, Virpi. SFTec Oy. Henkilökohtainen tiedoksianto 2.10.2018
2. Mujumdar, A.S. Handbook of industrial drying. Third edition, Taylor & Francis Group, LLC (2006).
3. Nablabs. 2018. Saatavissa: http://www.nablabs.fi/palvelut_alkuaineanalytiikka_ja_fysikaaliset_ominaisuudet.php. Haettu 1.12.2018.
4. Andritz. 2018. Saatavissa: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/belt-drum-fluid-bed-dryers/belt-dryer-cooler>. Haettu 19.11.2018.
5. Didion. 2018. Saatavissa: <http://www.didion.com/rotary-dryers.html>. Haettu 19.11.2018.
6. SFTec Oy. Saatavissa: <https://www.sftec.fi/new/modheat/>. Haettu 27.11.2018
7. Kukkonen, Eetu. SFTec Oy. Henkilökohtainen tiedoksianto. 10.10.2018
8. Flander, Markus. Kiinteän polttoaineen kuljetinjärjestelmän suunnittelu lämpölaitokseen. 2013. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Julkaisun pysyvä osoite: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201305087329>.
9. Tekniikan KAAVASTO. 2005. Tampere: Tammertekniikka. ISBN 978-952-5491-48-7
10. Holappa. Simo. Tmi. 2018. Re: Pohdintaa lapavälin vaikutuksesta syötteensiirron tehokkuuteen.
11. Valtanen, Esko. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis-kirjat Oy. ISBN978-952-9867-39-4.
12. Hirsijärvi, Sirkka – Remes, Pirkko – Sajavaara, Paula. 2003. Tutki ja kirjoita. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi. ISBN 951-26-5113-0

13. Vilka, Hanna. 2005. Tutki ja kehitä. 3 painos, Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi. ISBN 978-951-26-5269-3

14. Vilka, Hanna. 2006. Tutki ja havainnoi. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi. ISBN 978-951-26-5593-9