



HIILTOPROSESSIN TUTKIMINEN JA KEHITYS

Opinnäytetyö

Juha Huttunen

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Koneautomaatio

Hyväksytty ____ . ____ . ____ _____

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme

Mechanical Engineering

Author

Juha Huttunen

Title of Project

Research and Generating the Pyrolysis Process

Type of Project

Final Project

Date

September 12, 2009

Pages

42

Academic Supervisor

Mr. Risto Rönkä, Senior Lecturer

Company Supervisor

Mr. Juha Huttunen, Managing Director

Company

Onnistamo Oy

Abstract

The aim of this project was to find and research existing methods and systems for pyrolysis process of organic raw material and study how to design and generate the equipment and the pyrolysis process for the most economical, continuous and automatic thermochemical production of wood charcoal.

Pyrolysis is thermochemical decomposition of organic material in higher temperatures in the absence of oxygen and this project was made to find better solutions to accomplish the continuous and automatic process of pyrolysing the organic raw material to the wood charcoal. It was studied how to measure different processing products to find out the best production capacity. Equipment and methods for the most economical heating, cooling and controlling system were studied as well.

As a result of this project a pilot equipment and its function were designed and used for continuous wood charcoal manufacturing. It appeared that further research is required to improve the process and commercialize this manufacturing technology economically.

Keywords

pyrolysis, wood charcoal

Confidentiality

public

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO

Koulutusohjelma

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tekijä

Juha Huttunen

Työn nimi

Hiiltoprosessin tutkiminen ja kehitys

Työn laji

Opinnäytetyö

Päiväys

12.9.2009

Sivumäärä

42

Työn valvoja

yliopettaja Risto Rönkä

Yrityksen yhdyshenkilö

toimitusjohtaja Juha Huttunen

Yritys

Onnistamo Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin ja kehitettiin jatkuvatoimista grillihiilen valmistuslaitetta Onnistamo Oy:lle ja taustatutkimukseksi perehdyttiin puun koostumukseen, kuivatuslauksen teoriaan sekä grillihiilen ominaisuuksiin. Suunnittelun tueksi työssä tutkittiin myös nykyisiä grillihiilen valmistusmenetelmiä, -laitteita sekä niiden toimintaperiaatteita. Taustatutkimusten avulla jatkuvatoimiseen laitteeseen tehtiin parannus- ja kehitysehdotuksia hiiltoprosessin seurantaan, raaka-aineen syöttöön, lämmitysjärjestelmään ja laitteiston ohjaukseen.

Tutkimuksen ja kehitysideoinnin avulla työssä tehtiin suunnitteluohjeita pilottilaitteen valmistamiseksi ja oheisprosessien toteuttamiseksi lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmään sekä höyryntuotantoon. Suunnitteluohjeita tehtiin mm. rakenteiden suunnitteluun, materiaalin valintaan sekä lämpötilojen ja paineiden mittaamiseen. Suunnitteluohjeissa otettiin huomioon myös laitteiston ja henkilöstön koneturvallisuus sähkölaitteiden ja koneikkojen käytössä kuumassa ja räjähdysvaarallisessa ympäristössä.

Avainsanat

pyrolyysi, kuivatuslaus, grillihiili

Luottamuksellisuus

julkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	6
2. KUIVATISLAUSMENETELMÄT	7
3. PUUN KOOSTUMUS.....	8
3.1 Selluloosa	8
3.2 Hemiselluloosa	8
3.3 Ligniini	8
3.4 Uuteaineet	9
3.5 Epäorgaaniset yhdisteet	9
4. KUIVATISLAUKSEN TEORIA.....	10
5. GRILLIHIILEN OMINAISUUDET.....	11
6. GRILLIHIILEN TUOTANTOLAITOS.....	12
6.1 Tuotantolaitoksen yleiskuvaus	12
6.2 Tuotantolaitoksen rakenteiden suunnittelu	13
6.3 Tuotantolaitoksen materiaalien valinta.....	14
6.4 Sähkölaitteiden koteloitilukitus	15
6.5 Räjähdyksvaaralliset tilat	15
7. HIILETYSPROSESSIN SEURANTA.....	16
7.1 Hiiletysprosessin seuranta lämpötilojen avulla	16
7.2 Lämpötilan seuranta turvallisuuden kannalta.....	17
7.3 Lämpötila-anturit	17
7.4 Hiiletysprosessin paineet	18
7.5 Hiiletysprosessin seuranta paineiden avulla	19
7.7 Painekeytkimet ja -lähettimet.....	20

7.8 Hiiletysprosessin vaihtoehtoisia seurantamenetelmiä.....	20
7.9 Hiiletystuotantolaitoksen seuranta	21
7.10 Hiiletysprosessin ohjaus	22
8. TUOTANTOLAITOKSEN SYÖTTÖJÄRJESTELMÄ	23
8.1 Materiaalin syöttöjärjestelmä	23
8.2 Syöttöjärjestelmän käyttöjen mitoitus.....	28
9. TUOTANTOLAITOKSEN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄ.....	34
9.1 Hiiletysprosessin lämmitys.....	34
9.2 Puun pyrolysointi hiiletyslaitoksessa.....	34
9.3 Tuotantolaitoksen höyryenergia.....	36
9.4 Hakepolttuuni.....	37
9.5 Tulistin	38
9.6 Tuotantolaitoksen jäähdytys	38
9.7 Veden ja höyryn syöttöjärjestelmä	39
9.9 Lämpöenergian hyötykäyttö.....	39
10. JOHTOPÄÄTÖKSET	40
LÄHTEET.....	42

1. JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia ja kehittää jatkuvatoimista grillihiilen valmistuslaitetta ja tehdä tarvittavia esisuunnitelmia pilottilaitteen valmistamiseksi. Työssä perehdyttiin puun koostumukseen ja kuivatuslauksen teoriaan, grillihiilen ominaisuuksiin sekä nykyisiin valmistuslaitteisiin sekä niiden toimintaperiaatteisiin.

Työssä tehtiin parannus- ja kehitysehdotuksia hiiltoprosessin ohjaukseen, seurantaan ja koneturvallisuuteen, jotka toteutetaan lämpötila- ja paineantureilla. Työssä tutkittiin ja kehitettiin myös tuotantolaitoksen materiaalin syöttöjärjestelmää ja sen vaatimia käyttölaitteita, laitoksen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmää sekä höyryntuottamisen vaatimia käyttölaitteita.

Taustatutkimusten ja kehitysehdotusten avulla työssä tehtiin suunnitteluohjeita pilottilaitteen valmistamiseksi ja oheisprosessien toteuttamiseksi lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmään sekä höyryntuotantoon. Suunnitteluohjeita tehtiin mm. rakenteiden suunnitteluun, materiaalin valintaan sekä lämpötilojen ja paineiden mittaamiseen. Suunnitteluohjeissa otettiin huomioon myös laitteiston ja henkilöstön koneturvallisuus sähkölaitteiden ja koneikkojen käytössä kuumassa ja räjähdysvaarallisessa ympäristössä.

Opinnäytetyössä tehtiin esisuunnitelma ja suunnitteluohjeita jatkuvatoimisesta grillihiilen tuotantolaitoksesta ja sen vaatimista oheislaitteista.

2. KUIVATISLAUSMENETELMÄT

Kuivatislaus, eli pyrolyysi on orgaanisen aineen termokemiallista eli lämmön avulla muuntamista eri olomuotoihin, kiinteiksi, nesteiksi sekä kaasuiksi. Kun raaka-ainetta kuumennetaan ilmakeivässä, hapettomassa tilassa, se hajoaa ainesosiensa sulamis- ja kiehumispisteiden mukaan, jolloin kaasufaasina vapautuvat aineet sekä yhdisteet pääsevät reagoimaan keskenään kemiallisesti tuottaen satoja uusia yhdisteitä. Kuivatislaus voidaan suorittaa paineessa, tyhjiössä ja/tai happea syrjäyttävän kaasun avulla ja kuivatislausmenetelmät voidaan jakaa hitaan tai nopean kuumennuksen mukaan. Kuivatislausolosuhteet vaikuttavat kaasuntuuvien aineiden kemiallisiin reaktioihin ja siten kuivatislaus- tuotteiden saantoon. [1, s. 46 - 47.]

Hidas- ja nopeapyrolyysin välillä ei tunneta esimerkiksi keskinopeaa pyrolyysiä, joten tässä opinnäytetyössä hidasperilyysillä tarkoitetaan useita päiviä kestävää kuivatislausta ja nopeapyrolyysillä vain minuuteista muutamiin tunteihin kestävää kuivatislausta.

Hidasperilyysi on varovainen kuivatislausmenetelmä, jossa raaka-ainetta kuumennetaan hitaasti useita tunteja. Hitaasti kuumennettaessa eri lämpötilassa kaasuntuuvat aineet ehtivät reagoita toisiinsa muodostaen sekalaisia yhdisteitä. Hidasperilyysi on varovaisuutensa takia käytetyin menetelmä grillihiilen valmistuksessa, kun hiilen ulkomuoto halutaan säilyttää. Nopeapyrolyysissä raaka-aine kuumennetaan mahdollisimman nopeasti haluttuun kuumuuteen, jolloin kaasuntuuvat yhdisteet eivät ehdi reagoita toisiinsa merkittävästi. Nopeapyrolyysin tarkoitus on tuottaa mahdollisimman paljon öljymäisiä nesteitä jatkojalostukseen. Jäljelle jäävä hiili käytetään yleensä energiahiihenä. Kuivatislaus voidaan jakaa vielä panos- tai jatkuvatoimisiin menetelmiin. Hidasperilyysi on perinteinen panosmenetelmä, jossa puuraaka-aine kuumennetaan kuivatislaukseen rakennetussa uunissa, eli retortissa. [2, s. 5 - 7.]

Jatkuvatoimiset kuivatislausmenetelmät luokitellaan nopeapyrolyysiä hyödyntäväksi, koska kuivatislausta nopeutetaan tehokkaasti lämmöntuonnin avulla. Jatkuvatoimisia laitteistoja ovat suurtuotannossa esimerkiksi pystyretortit sekä sahajauhon kuivatislauksessa käytetyt ruuvikuljettimella varustetut putkiretortit. [3, s.15.]

Patentti- ja rekisterihallituksen Espacenet-patenttijulkaisutietokannasta pyrolyysiin viittaavalla patenttiluokituksella C10B on noin 2 200 eri suojattua kuivatislausta hyödyntävää menetelmää tai laitetta.

3. PUUN KOOSTUMUS

Puuaine muodostuu soluista, jotka ovat yhdistyneet kudoksiksi. Puun rakenteelliset komponentit eli puupolymeerit ovat selluloosa, hemiselluloosa sekä ligniini. Polymeerien lisäksi puu sisältää uuteaineita ja epäorgaanisia yhdisteitä.

3.1 Selluloosa

Selluloosa on luonnon lineaarinen polymeeri, puun soluseinän pääkomponentti. Selluloosa koostuu glykoosiyksiköistä, jotka sisältävät kolme vapaata hydroksyyli ryhmää (-OH). Näillä hydroksyyli ryhmillä on voimakas taipumus muodostaa vetysidoksia mm. hapen kanssa. Puussa on selluloosaa n. 40 % raaka-aineen kuivapainosta. [1, s. 28 - 45.]

3.2 Hemiselluloosa

Hemiselluloosa sisältää ksylaania, glukuroniksyylaania, arabinoksyylaania, glukomannaania ja ksyloglukaania. Hemiselluloosat ovat rakenteeltaan haaroittuneita polysakkarideja, jotka koostuvat monosakkaridiyksiköistä, joiden päätyyppejä ovat hektoosit, pentoosit, deoksihektoosit sekä uronihapot. Lehtipuun hemiselluloosa koostuu pääosin ksylaanista ja havupuun hemiselluloosa glukomannaanista. Puussa on hemiselluloosaa n. 25 - 35 % raaka-aineen kuivapainosta. [1, s. 28 - 45.]

3.3 Ligniini

Ligniini on haaroittunut ja verkkomainen luonnon polymeeri, joka koostuu aromaattisista fenyylipropaaniyksiköistä. Havupuun ligniiniä kutsutaan guajasyyliligniiniksi ja lehtipuun ligniinia guojasyyli-syringyylliligniiniksi. Ligniini on pääasiassa sitoutunut puun hemiselluloosiin mutta sidokset selluloosan kanssa ovat harvinaisia. Puussa on ligniiniä n. 25 - 35 % raaka-aineen kuivapainosta. [1, s. 28 - 45.]

3.4 Uuteaineet

Kasvisolut sisältävät erilaisia uuteaineita, jotka eivät kuulu solurakenteeseen mutta vaikuttavat puun ominaisuuksiin ja käyttöön. Uuteaineita on n. 1 % pinta-puussa ja jopa 20 % sydänpuussa. Uuteaineita ovat mm. vahat, rasvat, hartsi-hapot, fenoliset yhdisteet (esim. lignaani, tanniini, stilbeeni) ja terpeenit (pihka). Puun uuteaineet ovat pihkoja, joilla puu puolustautuu sisäisiä ja ulkoisia tekijöitä vastaan. Uuteaineet vaikuttavat olennaisesti puun väriin, tuoksuun sekä kestä-vyyteen. Uuteaineet osallistuvat myös ravinnon varastointiin. Puussa on uuteai-neita n. 4 % raaka-aineen kuivapainosta. [1, s. 28 - 45.]

3.5 Epäorgaaniset yhdisteet

Epäorgaanisia yhdisteitä on runsaammin neulasissa ja lehdissä mutta runko-puussa erittäin vähän. Epäorgaanisten yhdisteiden pääkomponentteja ovat kal-siun (Ca), kalium (K) sekä magnesium (Mg). Pienempiä pitoisuuksia mm. man-gaani (Mn), natrium (Na), fosfori (P) ja rauta (Fe). Puussa on epäorgaanisia yh-disteitä n. 1 % raaka-aineen kuivapainosta. [1, s. 28 - 45.]

4. KUIVATISLAUKSEN TEORIA

Kun ilmakeivaa puuraaka-ainetta aloitetaan kuumentaa suljetussa tilassa, poistuu siitä ensin mekaanista vettä. Lisää kuumennettaessa haihtuu myös puun uuteaineissa olevia herkimpiä fenolisia yhdisteitä, steroleja sekä terpenoideja. [1, s. 46 - 64.]

Puuaine, tarkemmin ligniini, alkaa hajota n. 170 °C:ssa ja kuumennettaessa 270 °C:seen myös hemiselluloosa alkaa hajota vapauttaen eksotermisesti reaktiolämpöä. Hajoamistuotteina syntyy vettä hapen yhtyessä vetyyn sekä hiilidioksidia sekä hiilimonoksidia hapen yhtyessä hiileen. Tässä vaiheessa syntyy myös vesiliukoisia, happipitoisia aineita kuten etikkahappoa, metanolia, asetonia, fenolisia yhdisteitä sekä terpenoideja. [1, s. 46 - 64.]

Lämpötilaa nostettaessa puuaine hajoaa useiksi komponenteiksi muodostaen hiilivetyjä, kuten metaania, asetyleeniä, etyleeniä, raskaampia terpenoideja sekä etikkahappoa ja metanolia. Hiilivetyjen reagoidessa toisiinsa alkaa muodostua myös pidenpikettjuisia yhdisteitä ja niiden sekoituksia, joita kutsutaan puuhapoksi ja tervaksi. [1, s. 46 - 64.]

Kun puuraaka-aine on kuumennettu yli 700 °C:seen, sen kaasuuntuvat yhdisteet ovat pääsääntöisesti tislautuneet ja jäljelle jää hiiltä, hiileen sitoutunutta vetyä sekä epäorgaanisia yhdisteitä. [1, s. 46 - 64.]

5. GRILLIHIILEN OMINAISUUDET

Grillihiihi valmistetaan aina lehtipuusta, kuten koivusta tai lepästä, koska havupuun poltto vapauttaa syöpää aiheuttavia aineita. Puhtaan puuhiilen lämpöarvo on noin 35 MJ/kg, ts. 8,33 KWh/kg, ja grillihiilessä noin 25 - 30 MJ/kg, koska siinä on vielä kaasuuntumattomia sideaineita jäljellä. Grillihiihi palaa ensin pienellä liekillä, jolloin kaasuuntuvat aineet muodostavat näkyvän liekin, ja lopuksi vain hehkumalla, jolloin palamisreaktio syntyy hapen yhtymisestä hiileen.
[2, s. 12 - 13.]

Hyvän grillihiilen hiilipitoisuus on 80 - 85 %, tuhkapitoisuus 0,5 - 3 % ja kosteus 5 - 7 %. Hiilen palakoko on parhaimmillaan 20 - 80 mm. Ominaisuudet on määritetty helpon sytyttämisen, riittävän lämpöarvon sekä käsiteltävyyden kannalta.
[2, s. 12 - 13.]

Suomessa tunnetaan muutamia kymmeniä grillihiilen valmistajia, joiden yhteinen grillihiilen tuotanto on 200 - 400 t. vuodessa. Suomen grillihiilen kulutus on 3 500 - 4 500 t. vuodessa, joten tuonnin määrä on 90 - 95 %.
[2, s. 12 - 13.]

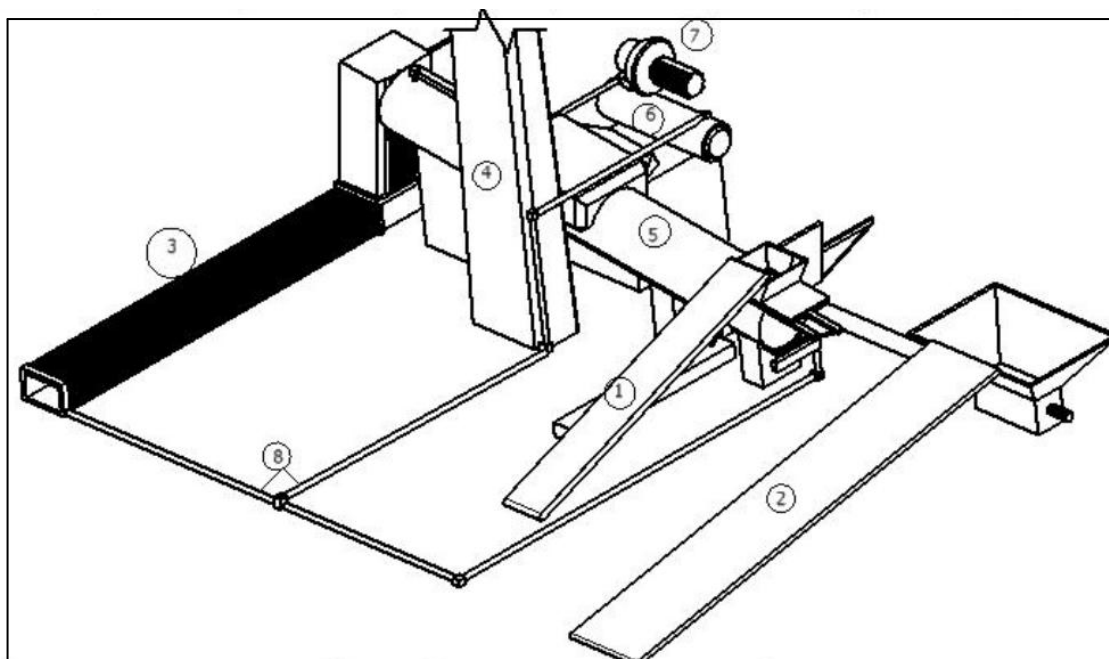
Taulukko 1. Puuhiilen keskimääräisiä ominaisuuksia. [4]

Ominaisuus	Yksikkö
Tiheys	100 - 500 kg/m ³
Irtotiheys	130 - 150 kg/i-m ³
Ominaispinta-ala	1 - 2 m ² /g
Lujuus	Puulajin ja valmistusprosessin mukaan
Kosteus	1 - 16 %
Haihtuvat aineet	7 - 30 %
Kiinteä hiili	80 - 90 %
Lämpöarvo	30 - 35 MJ/kg
Rikkipitoisuus	< 0,05 %
Fosforipitoisuus	< 0,03 %
Tuhkapitoisuus	0,5 - 10 %

6. GRILLIHIILEN TUOTANTOLAITOS

6.1 Tuotantolaitoksen yleiskuvaus

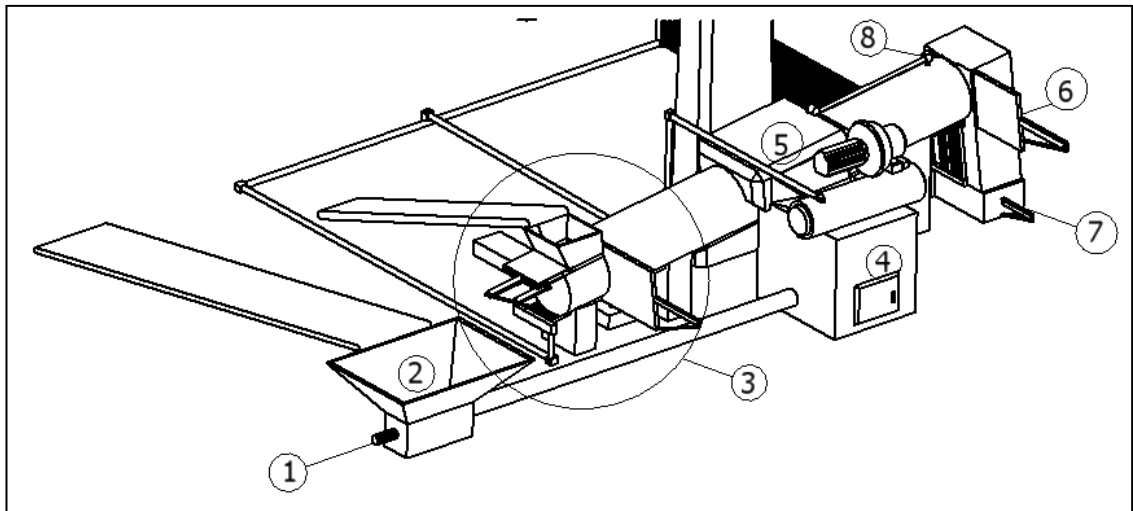
Pilkottua puuta syötetään sylinterillä hiiltoputkeen, jossa hiiltyminen tapahtuu satojen asteiden lämpötilassa hapettomassa tilassa. Tuotantolinja valmistaa puusta grillihiiltä ja kaasuuntuvat yhdisteet käytetään prosessin kuumentamiseen. Kuvista 1 ja 2 selviää tuotantolaitoksen pääkomponentit.



Kuva 1. Grillihiilen tuotantolaitoksen periaatekuva 1.

Kuvissa 1 ja 2 on numeroitu tuotantolaitoksen pääkomponentit.

- Nro 1 on liukuhihna, jolla hiiletettävä materiaali syötetään panostusta varten.
- Nro 2 on liukuhihna, jolla syötetään puumurskaa kattilan syöttöruuville.
- Nro 3 on valmiin hiilen jäähdytiskanava.
- Nro 4 on savupiippu.
- Nro 5 on hiiletysputki, jossa puun hiiltyminen tapahtuu.
- Nro 6 on höyrykattila, johon johdetaan prosessista syntyvä vesi.
- Nro 7 on höyrymoottori, jonka avulla höyryenergia muutetaan sähköenergiaksi.
- Nro 8 on vesikanava jäähdytysvedelle ja höyrymoottorille.



Kuva 2. Grillihiilen tuotantolaitoksen periaatekuva 2.

- Nro 1 on sähkömoottori, joka pyörittää hakepolttokattilan syöttöruuvia.
- Nro 2 on poltettavan materiaalin syöttökaualo.
- Nro 3 on tuotantolaitoksen syöttömekanismi.
- Nro 4 on hakepolttokattila.
- Nro 5 on savukaasutunneli, joka lämmittää hiiletysputkea.
- Nro 6 on sylinteritoiminen luukku ennen jäähdytystä.
- Nro 7 on sylinteri, joka työntää hiiltä jäähdytyskanavaan.

6.2 Tuotantolaitoksen rakenteiden suunnittelu

Rakenteiden suunnittelussa ja materiaalien valinnassa on otettava huomioon hiiletysprosessin korkea lämpötila ja vesihöyryn aiheuttama paine. Olosuhteet voivat vastata höyrykattilaa, jossa paine on yleensä 8,5 - 22 MPa. Vaativin rakenteiden suunnittelu liittyy riittävän tiiveyden saavuttamiseen, jos prosessi toteutetaan paineistetussa tilassa.

Ohjeita rakenteiden suunnitteluun löytyy Suomen Standarditoimistoliiton standardista SFS-EN 12952-1-16, joka koskee vesiputkikattiloita, joita lämmitetään polttamalla yhtä tai useampaa polttoainetta. Lämmitys voidaan myös tehdä kuumilla kaasuilla höyryn ja kuumun veden kehittämiseksi. Paineastian mitoitukseen liittyviä standardeja ovat esimerkiksi SFS 3273, SFS 3274 ja SFS 3275. [5]

Turvatekniikan keskus TUKES tarjoaa ohjeita ja painelaitesäädöksiä erilaisille painelaitteille:

- painelaitelaki (869/1999) painelaitteisiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar.
- asetus painelaitelaissa tarkoitetuista tarkastuslaitoksista (890/1999).
- asetus kattilalaitosten käytön valvojien pätevyyskirjoista (891/1999).
- kauppa- ja teollisuusministeriön päätös yksinkertaisista painesäiliöistä (917/1999).
- kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaitteista (938/1999).
- kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaiteturvallisuudesta (953/1999). [6]

6.3 Tuotantolaitoksen materiaalien valinta

Höyrykattilarakenteissa yleisesti käytetty materiaali on 13CrMo4-5, jossa hiiltä on n. 0,13 %, kromia n. 0,9 % ja molybdeenia n. 0,5 %. Höyrykattilarakenteista on määräyksiä standardissa SFS-EN 10028-2. [7]

Paineastiateräksiä ovat mm. P355N ja P355GH. Paineastiateräksiin liittyviä standardeja ovat SFS-EN 10027-1 ja SFS-EN 10028-2. Yksinkertaisiin painesäiliöihin on myös standardi SFS-EN 10207. [8]

Rakenteiden suunnittelussa kannattaa ottaa huomioon myös tulenkestävät materiaalit, joita käytetään polttimissa, arinoissa, lämpökäsittelyuuneissa ja sementtiuuneissa. Esimerkiksi valuteräs standardin SFS 393 mukaan kestää 550 - 800 asteen lämpötiloja. Valuteräksessä on hiiltä n. 0,4 %, sinkkiä n. 1,5 %, kromia n. 26 % ja nikkeliä n. 20 %.

Erittäin kuumiin olosuhteisiin parhaat ratkaisut löytyvät keraameista, jotka kestävät jopa 1500 C°:een lämpötiloja. Standardin SFS-EN 10028 mukaan alle 500 C°:een lämpötilassa voi materiaalina käyttää esimerkiksi 13CrMo4-5 tai 10CrMo9-10, mitkä soveltuvat hyvin syöttömekanismin rakenteisiin jos ne eivät ole paineistetussa tilassa. Vieläkin korkeimmissa lämpötiloissa sopiva materiaali on esimerkiksi X10CrMoVNB9-1. [9]

6.4 Sähkölaitteiden koteloitilukitus

Hiiletysprosessissa vallitsee korkeita lämpötiloja sekä siellä on syttyviä kaasuja ja nesteitä, joten laitteiden kotelointi ja suojaus on oltava olosuhteiden mukainen. Sähkölaitteiden koteloitiluokitus on kuvattu kuvassa 3 ja koteloitiluokitukset on määritelty standardista SFS-EN 60 529. [10]

IP-xy			
X	Vaarallisten osien kosketussuojaus ja laitteen pölyntiiviys	y	Vasisuojaus
0	Avoin, suojaamaton rakenne	0	Suojaamaton
1	Suojattu yli 50mm kappaleiden sisääntunkeutumiselta	1	Suojattu tippuvaa vettä vastaan
2	Suojattu yli 12mm kappaleiden sisääntunkeutumiselta	2	Suojattu tippuvaa vettä vastaan laitteen ollessa 15° kallellaan
3	Suojattu yli 2,5mm kappaleiden sisääntunkeutumiselta	3	Suojattu sadetta vastaan
4	Suojattu yli 1,0mm kappaleiden sisääntunkeutumiselta	4	Suojattu roiskuvaa vettä vastaan
5	Suojattu pölynsisääntunkeutumista vastaan	5	Suojattu vesisuihkuja vastaan
6	Pölynpitävä	6	Suojattu korkea aallokkoa vastaan
		7	Suojattu veteen kastamista vastaan
		8	Suojattu veteen upottamisen vaikutuksilta

Kuva 3. Sähkölaitteiden koteloitiluokitus.

6.5 Räjähdyksivaaralliset tilat

Hiiletysprosessi tapahtuu osittain räjähdysvaarallisessa tilassa, jossa räjähdysvaaraa aiheuttavat palavat kaasut, palavat nesteet ja ilmaan sekoittuva paloherkkä pöly. Räjähdysvaarattomasta hiilestä voi myös syntyä ilmaan hiilipölyjä, joista voi muodostua räjähdyskelpoisia ilman ja pölyn seoksia. Koska puuta käsitellään kuumien olosuhteiden läheisyydessä, on myös otettava huomioon mahdollinen puupöly, joka voi muodostua räjähdyskelpoiseksi säiliömäisissä rakenteissa. Räjähdysvaarallisille tiloille on EX-luokitus ja räjähdysvaaralliset tilat jaetaan kolmeen luokkaan:

Luokka 0, räjähdysvaarallisia kaasuja tilassa jatkuvasti tai pitkiä aikoja

Luokka 1, räjähdysvaarallisia kaasuja tilassa työskentelyaikana

Luokka 2, räjähdysvaarallisia kaasuja tilassa lyhyitä aikoja. [11]

Kaasuräjähdyksivaarallisten tilojen sähkölaitteita ja -asennuksia käsitellään standardisarjassa IEC 60079 ja sen pohjalta tehdyissä EN-standardieissa SFS-EN 60079-14 ja SFS-EN 60079-17. [12]

7. HIILETYSPROSESSIN SEURANTA

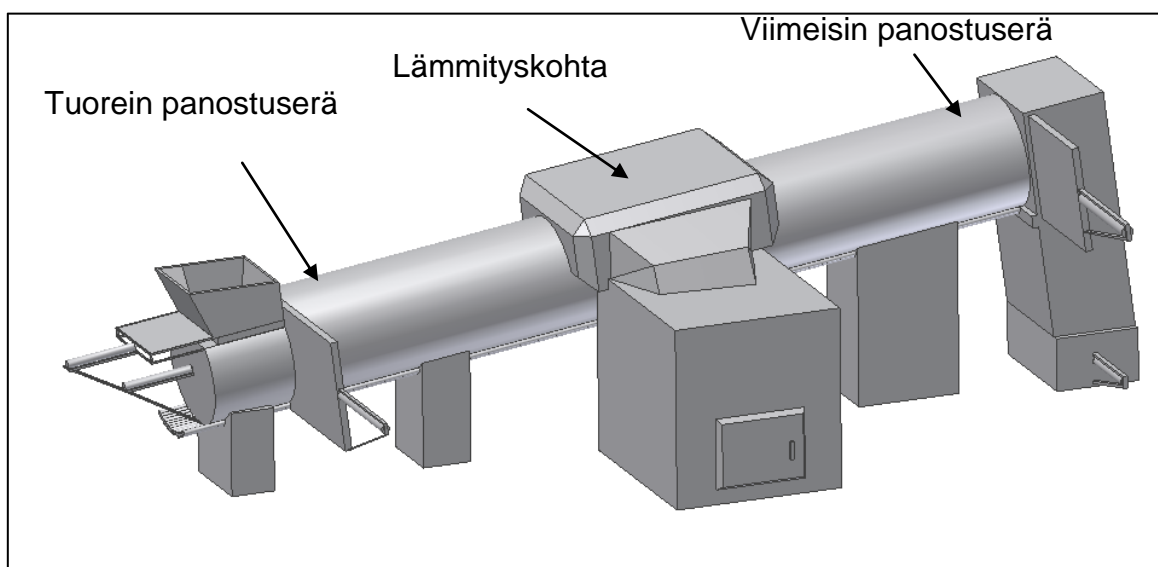
7.1 Hiiletysprosessin seuranta lämpötilojen avulla

Hiiletysprosessissa vallitsee satojen asteiden lämpötiloja. Lämpötila vaikuttaa puun hiiltymisen nopeuteen ja lopputuotteen laatuun. Hiiltolämpötilan vaikutus puuhiilen saantoon ja koostumukseen on esitetty kuvassa 4.

Lämpötila °C	Saanto %	Puuhiilen koostumus	
		% C	% H
200	91,8	52,3	6,3
300	51,4	73,3	4,9
400	40,6	77,7	4,5
500	31,0	89,2	3,1
600	29,1	92,2	2,6
700	27,8	92,8	2,4
800	26,7	95,7	1,0
900	26,6	96,1	0,7

Kuva 4. Hiiltolämpötilan vaikutus puuhiilen saantoon ja koostumukseen. [13]

Puun hiiletys tapahtuu metallikuorisessa hiiletysputkessa, jossa on samaan aikaan eri prosessin vaiheita panostuserien mukaan. Pienimmät lämpötilat ovat tuoreimmassa panostuserässä, jolloin puun kuivaminen ja esilämmitys alkaa. Suurimmat lämpötilat vallitsevat hiiletysputken loppupäässä ja kohdassa, jossa häikäkaasut lämmittävät hiiletysputkea. Kuva 5 selvittää hiiletysputken rakennetta.



Kuva 5. Hiiletysputki grillihiilen tuotantolinjassa.

Panostuserien lämpötilojen seurannan avulla prosessia voidaan ohjata uuden materiaalierän panostusta varten. Hiiletysputken metallivaippa estää panostuserän todellisen lämpötilan mittauksen, mutta riittävä tieto saadaan, kun lämpötila mitataan rakenteiden eri kohdista, valmiista hiilestä, vesihöyrystä ja pyrolyysiöljystä. Hiiletystuotantolinjan ensimmäisessä versiossa yksi tärkein tutkimusaihe on selvittää parhaimmat menetelmät ja sijoituspaikat lämpötilantureille.

7.2 Lämpötilan seuranta turvallisuuden kannalta

Korkeat lämpötilat vaikuttavat materiaalien ja komponenttien valintaan, joten ennen ensimmäisiä tutkimustuloksia ensimmäiset valinnat on tehtävä suunnittelun ja hyvien arvauksien perusteella. Rakenteita ja laitteita on suojeltava riittäväällä jäähdytyksellä. Syöttöjärjestelmän koneikon ja sähkökäytön toiminta on riippuvainen ilman lämpötilasta. Jos ilman lämpötila koneikon lähellä kohoaa yli 40 °C:seen, on koneikko varustettava erillisellä tuulettimella.

Lämpötiloja on seurattava laitteiden toimivuuden takia ja materiaalien keston kannalta. Hiiltolämpötila vaikuttaa puuhiilen saantoon ja koostumukseen, joten hiiltolämpötila on pyrittävä pitämään vakiona. Kun puu lämpiää tarpeeksi, siitä vapautuu lämpöenergiaa ympäristöön eksotermisesti. Eksotermisen reaktion hiiltoiputuksessa voi nostaa hiiltolämpötilan niin suureksi, että prosessia on jäähdytettävä ulkoisesti. Hiiletystuotantolaitoksessa jäähdytys kannattaa toteuttaa mahdollisuuksien mukaan vesijäähdytyksellä, koska lämmennyt vesi voidaan hyödyntää höyryn tuottamisessa. Lämpötila on hiiletystuotantolaitoksen merkittävin seurattava suure. Sen avulla ohjataan prosessin kulkua, jäähdytystä ja mahdollisesti lämmitystä.

7.3 Lämpötila-anturit

Lämpötila-anturit voivat olla esimerkiksi elektronisia tai sähkömekaanisia, analogisia tai digitaalisia. Lämpötila-antureita voi asentaa kiinteästi rakenteisiin, tai ne voivat mitata lämpötilaa IR-tekniikalla, kuten lämpökamerat. Hiiletystuotantolaitoksen kanalta lopulliset anturivalinnat on valittava ensimmäisen laitteiston tutkimustulosten perusteella. [14]

7.4 Hiiletysprosessin paineet

Kun puuta lämmitetään, siitä vapautuu vesihöyryä, jonka avulla hiiletysputken painetta voidaan säädellä. Kuvan 6 taulukon mukaan vesihöyryn paine voidaan nostaa lämmityksen avulla erittäin suureksi.

Paine aiheuttaa ongelmia rakenteiden tiivistyksen kanssa, joten tuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa paine on mielekästä pitää alhaisena tiivistyskustannuksien takia.

Höyrymoottorille syötetty vesihöyry on oltava riittävän paineen alaisena ja vesihöyryn on oltava riittävän kuumaa, ettei siihen muodostu kiinteää vettä, joka kuluttaa höyrymoottoria nopeasti.

Hiiletysprosessissa syntyvä vesihöyry on johdettava painekattilaan, jota lämmitetään tuotantolaitoksen hakepolttouunilla.

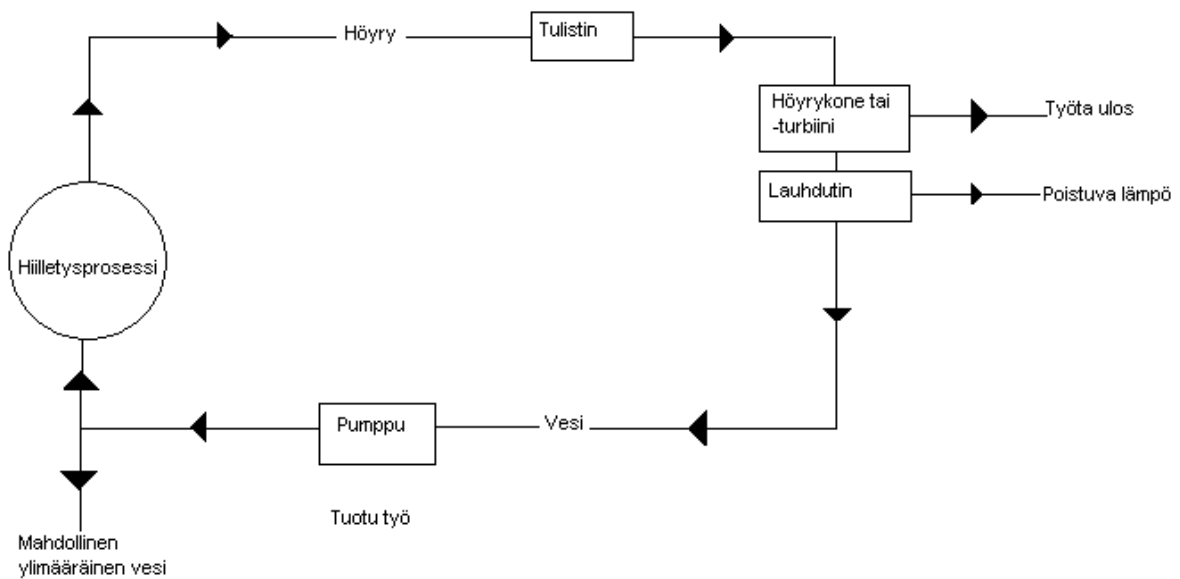
Tarvittaessa järjestelmään on myös sijoitettava tulistimia, jotka pitävät vesihöyryn riittävän kuumana höyrymoottorin kannalta.

t °C	p_{vs} bar	r kJ/kg
0	0,0061	2500
20	0,0234	2453
40	0,0738	2406
60	0,1993	2359
80	0,474	2308
100	1,013	2256
120	1,985	2200
140	3,61	2140
160	6,18	2080
180	10,02	2020
200	15,54	1940
220	23,2	1860
240	33,4	1770
260	46,9	1660
280	64,1	1540
300	85,8	1400
320	112,8	1240
340	145,9	1030
360	186,6	720
374,98	220,55	0

Kuva 6. Veden höyrynpaine kyllästystilassa p_{vs} ja höyrystymislämpö r lämpötilan funktiona. [15]

Tuotantolaitoksen päätuotteet ovat grillihiili sekä kaasujen ja vesihöyryn avulla tuotettu energia. Tuotantolaitosta voidaan pitää pienenä höyryvoimalaitoksena, jonka suunnittelu on suuri osa projektia. Höyryvoimalaitoksia on olemassa lukuisia, joten valmiita toteutusmalleja on mahdollista mukauttaa tuotantolaitoksen yhteyteen.

Kuvassa 7 on esitetty periaatekaavio, kun tuotantolaitos toimii höyryvoimalaitoksena. Kaaviosta puuttuu erillinen painekattila, jota lämmitetään hakepolttouunilla. Painekattila sijoittuisi kaaviossa hiiletysprosessin jälkeen.



Kuva 7. Höyryvoimalaitoksen periaatekaavio.

7.5 Hiiletysprosessin seuranta paineiden avulla

Hiiletysprosessin aikana paine on mielekästä pitää vakiona tasaisen laadun takaamiseksi. Hiiletysputken todellista painetta on vaikea mitata, mutta riittävä tieto saadaan prosessista vapautuvan vesihöyryn paineesta. Hiiletysputken painetta on pystyttävä säätämään venttiilin avulla. Paineen laskeessa prosessin lämpötila voi laskea haluttua alemmaksi, toisaalta nousu voi aiheuttaa vaaratilanteen laitteistolle tai sen käyttäjälle. Hiiletysprosessin paine ja lämpötila ovat riippuvaisia toisistaan, joten lämmityksen, jäähdytyksen ja uuden materiaalin panostuksen ohjaus tapahtuu näiden avulla.

Tuotantolaitoksessa höyrymoottori vaatii tietyn paineen, joten painetta on seurattava ja ohjattava sille sopivaksi. Tuotantolaitos höyryvoimalaitoksena on oma kokonaisuutensa, jonka ohjaus ei voi olla täysin riippuvainen hiiletysprosessista. Hiiletysprosessista syntyvä vesihöyry käytetään hyväksi sähköenergian tuotannossa, mutta suurin osa vesihöyrystä tuotetaan erillisellä painekattilalla. [16]

Tuotantolaitoksen koneikkojen paineenseuranta on tärkeää laitteistojen keskeisyyden kannalta. Paineen häviäminen aiheuttaa nopeasti esimerkiksi hydraulipumpun rikkoutumisen ja paineen liiallinen nousu aiheuttaa vaaratilanteita. [16]

7.7 Painekytkimet ja -lähettimet

Käyttökohteesta riippuen on mahdollista valita esimerkiksi keraamiskapasitiivisella mittakennolla varustettuja malleja, tai malleja, jotka on toteutettu metallisella mittakennolla ja paksukalvotekniikalla. Lähtötoimintoja ja kotelomalleja on runsaasti erilaisiin prosesseihin. Painetta on seurattava tuotantolaitteiston ensimmäisessä versiossa ja lopulliset valinnat paineen seuraamiseen ja paineen avulla ohjaamiseen tehdään ensimmäisen tuotantolaitoksen tutkimustulosten perusteella. [17]

7.8 Hiiletysprosessin vaihtoehtoisia seurantamenetelmiä

Virtauskytkimet ja -lähettimet ja virtausmittarit soveltuvat kaasujen ja nesteiden valvontaan. Tuotantolaitoksessa niitä voi käyttää vesihöyryn, pyrolyysiöljyn ja jäähdytysveden seurantaan ja ohjaukseen. Virtauksien seuranta ja ohjaus voi olla myös tärkeää höyryvoimalaitoksen ohjauksessa.

Virtausantureita on esimerkiksi kalorimetrisiä tai ultraääniperiaatteella toimivia ja niiden signaalit voidaan siirtää suoraan ohjausjärjestelmään edelleen käsiteltäväksi. Vesihöyryn koostumusta voi mitata esimerkiksi kaasuanalysointiantureilla. [14]

Pinnankorkeuden mittausta voi käyttää tervasaannon seurannassa ja mahdollisessa ohjauksessa, jos tavoitteena on kerätä tietyn tilavuuden eriä. Samanlainen erän ohjaus on mahdollista ja tarkempaa toteuttaa massan mittauksella. Massan mittausta voi myös hyödyntää esimerkiksi hiilen saannon selvittämiseksi raakapuusta. Hiilen punnituksella voi saada tietoa hiilen kosteudesta. Kosteuden mittausta on kuitenkin viisasta suorittaa kosteusmittareilla. Väri- ja kontrastianturilla on mahdollista seurata pyrolyysiöljyn koostumusta. [13, s. 21 - 22.]

Grillihiilen tuotannossa hiilen pehmeuden mittaaminen olisi paras tapa selvittää, milloin hiili olisi valmis jäähdytettäväksi. Hiiletysputken metallivaippa estää perinteiset anturointimenetelmät. Gamma-anturi on ainut vaihtoehto, mikä saattaisi antaa tietoa hiilen pehmeudesta säteilyn perusteella, mutta todennäköisesti suuret lämpötilat estäisivät luotettavan mittaustuloksen. [16]

Grillihiilen pehmeuden mittausta on mahdollista toteuttaa mekaanisesti työntämällä mittaustikkua materiaalin läpi ja mittaamalla siihen vaadittu voima esimerkiksi voima-anturilla. Mekaaninen toteutus on ongelmallinen sen tiivyyden toteuttamisen kanalta. Hiiletystuotantolaitoksen ohjaus kannattaa pyrkiä toteuttamaan lämpötilan ja paineen avulla, jotta ylimääräisiltä komponenteilta ja suunnittelulta vältyttäisiin.

Koneikossa sylintereiden asemaa voi seurata rajakytkimillä, jotka ovat joko ulkoisia tai upotettuina sylintereihin. Sylintereiden työntövoimaa voi seurata voima-antureilla tai yksinkertaisemmin mutta epävarmemmin paineesta. Koneturvallisuuden puitteissa tuotantolinja on varustettava riittäväillä suojoitoimenpiteillä, jotka estävät ihmisen loukkaantumisen. Läsnaoloantureita on laaja valikoima kaikenlaisiin sovellutuksiin, joilla voidaan parantaa turvallisuutta. Myös aidattu alue toimii suojana. [14]

7.9 Hiiletystuotantolaitoksen seuranta

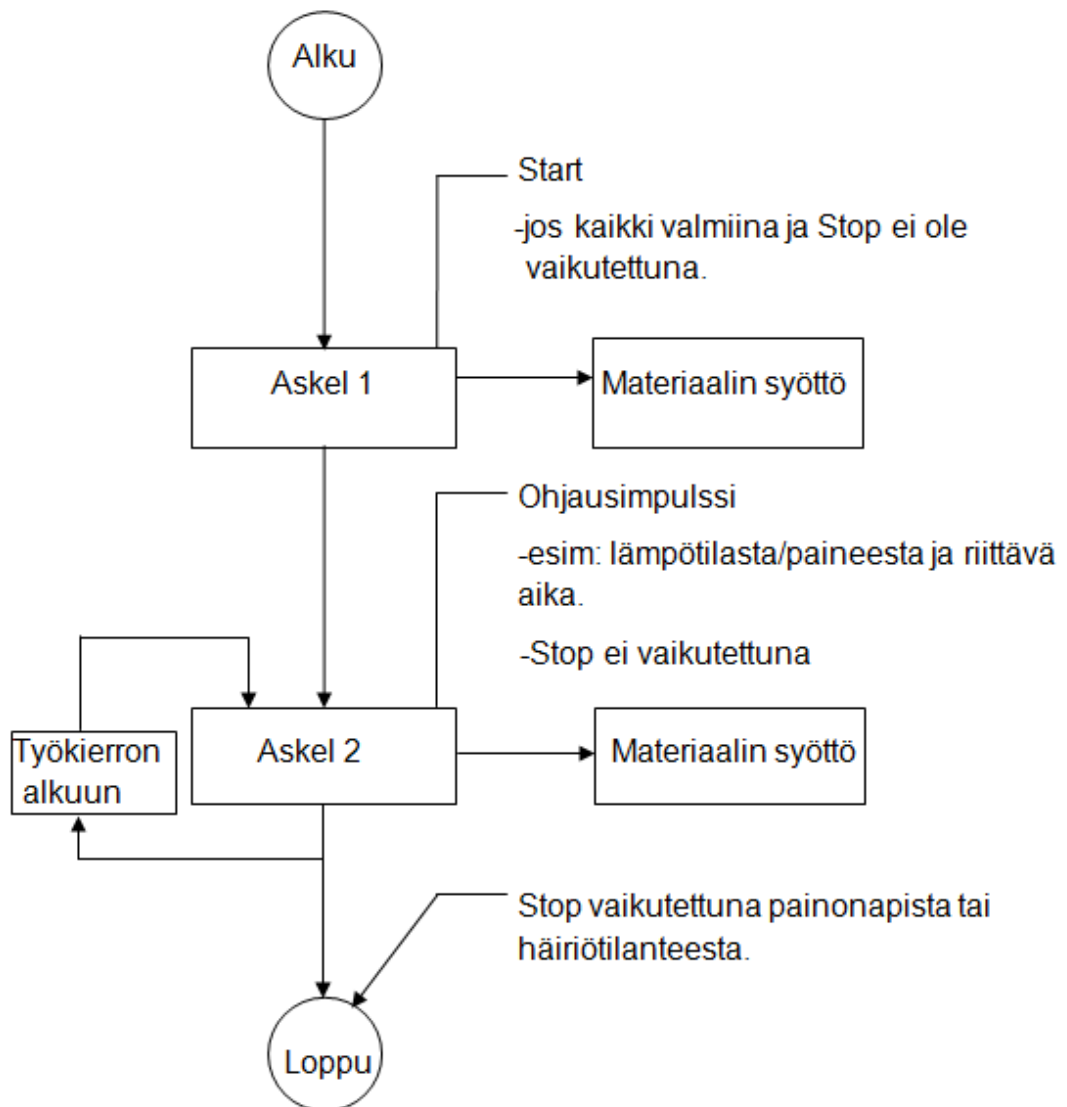
Hiiletystuotantolaitoksella on useita lopputuotteita ja se koostuu useista kokonaisuuksista. Seurattavia toimintoja ja olosuhteita on paljon joista useat vaikuttavat toisiinsa. Ratkaisuja ja erilaisia menetelmiä seurantaan ja ohjaukseen on erittäin paljon, joista parhaat menetelmät selviävät ensimmäisen tuotantolaitoksen tutkimustulosten perusteella.

Tuotantolaitoksen ensimmäinen versio pyritään rakentamaan mahdollisimman yksinkertaiseksi kustannusten takia. Lopputuotteiden paras laatu sekä nopein tuotantoaika on vaikeaa selvittää ilman monipuolista prosessin seurantaa. Tuotavuuden kannalta tuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa seurattavia kohteita on parempi olla liikaa kuin liian vähän. Tuotantolaitoksen ainutlaatuisuuden takia ensimmäisten koeajojen aikana tulee todennäköisesti vastaan paljon yllättäviäkin asioita, joita ei ole osattu huomioida. Mitä enemmän tuotantolaitoksen ensimmäinen versio tuottaa tutkimustuloksia, sitä helpompaa seuraavan version suunnittelu ja toteutus on.

7.10 Hiiletysprosessin ohjaus

Hiiletysprosessia ohjataan esimerkiksi paineen tai lämpötilan avulla. Kun viimeinen panostettava erä on hiiltynyt, saa materiaalisyöttö ohjausimpulssin ja uusi materiaalierä panostetaan hiiletysputkeen.

Hiiletysprosessin syötön karkea ohjausesimerkki on esitetty kuvassa 8.

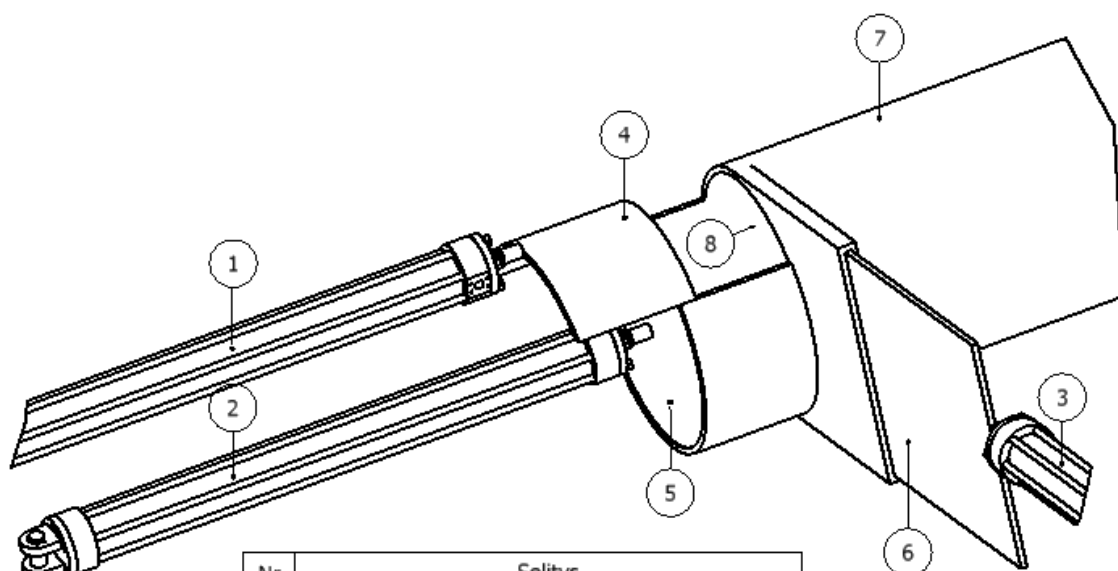


Kuva 8. Syötön ohjausesimerkki.

8. TUOTANTOLAITOKSEN SYÖTTÖJÄRJESTELMÄ

8.1 Materiaalin syöttöjärjestelmä

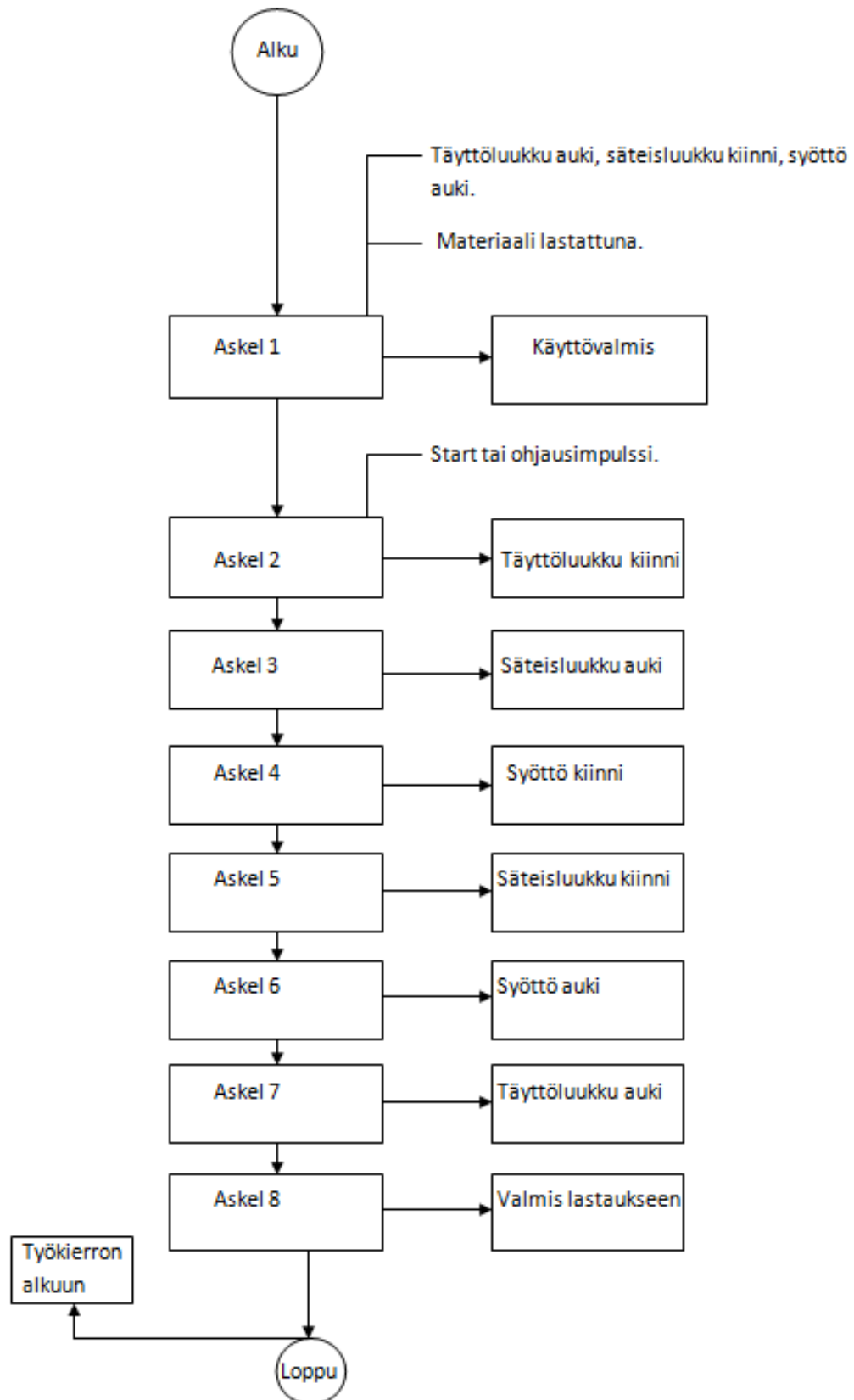
Materiaalin syöttöjärjestelmä, joka on kuvattu kuvassa 9, toimii kolmella käyttösylinterillä. Pääsylinterinä voidaan pitää sylinteriä 2, joka syöttää materiaalin hiiletysputkeen. Toinen sylinteri, nro. 3 toimii säteittäisluukun sulkijana. Säteittäisluukun tehtävä on tiivistää hiiletysputki, jotta pääsylinteri voi palata alkuasentoon, jolloin uusi materiaali voidaan lastata. Kun materiaalia syötetään hiiletysputkeen, on säteittäisluukun avauduttava. Kolmas sylinteri, nro. 1 toimii täyttöluukun sulkijana. Täyttöluukku on täyttötilan päällä ja luukku sulkeutuu ennen kuin säteittäisluukku avautuu ja pääsylinteri työntää materiaalin hiiletysputkeen. Syöttöjärjestelmän periaatekuvasta 9 selviää mekanismin pääidea.



Nr	Selitys
1	Sylinteri 1. Täyttöluukun käyttö
2	Sylinteri 2. Syötön käyttö
3	Sylinteri 3. Säteisluukun käyttö
4	Täyttöluukku
5	Syöttö
6	Säteisluukku
7	Hiiletysputki
8	Painetila

Kuva 9. Syöttöjärjestelmän periaatekuva.

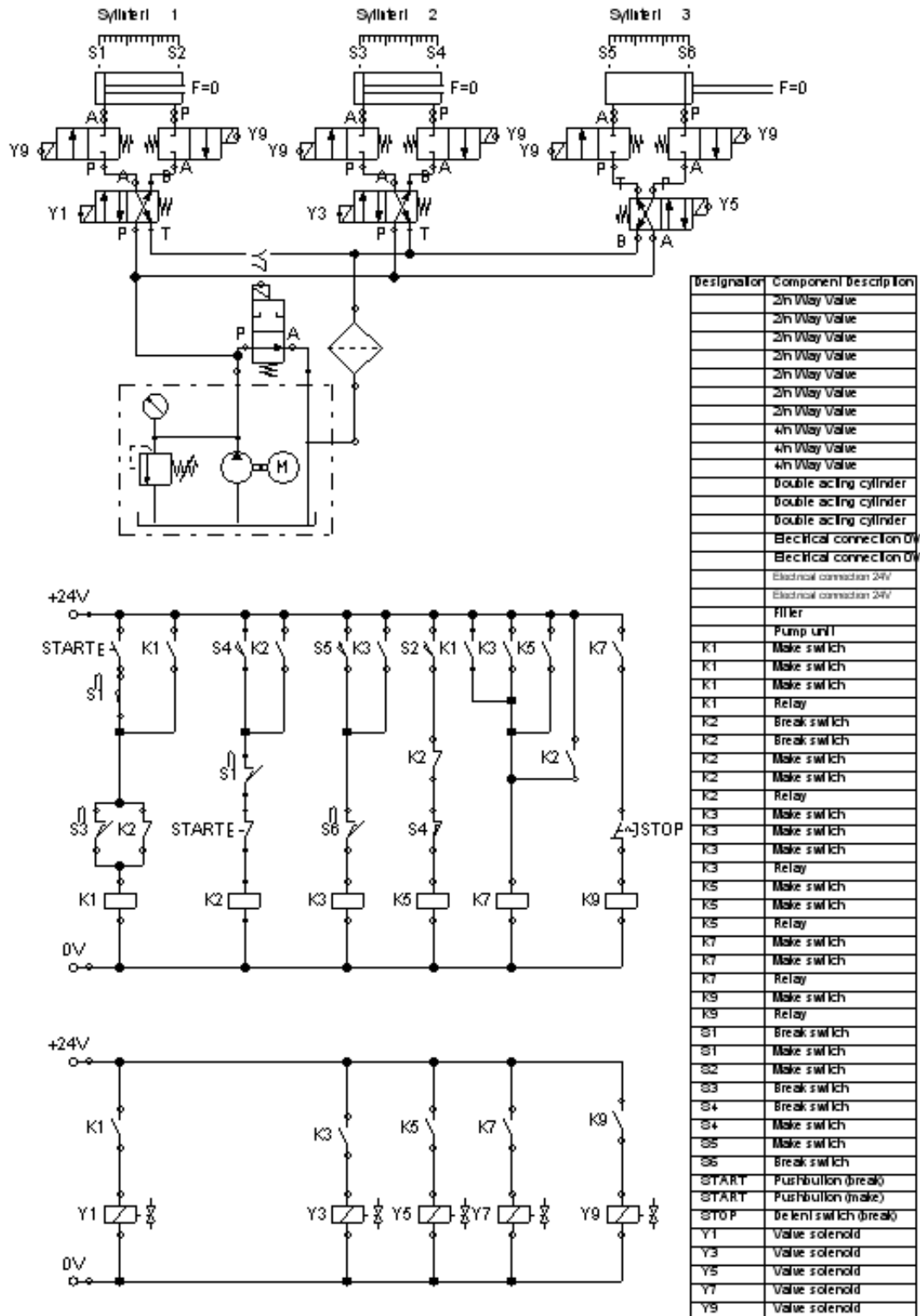
Materiaalin syöttöjärjestelmän sanallinen toimintakaavio on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Syötön sanallinen toimintakaavio.

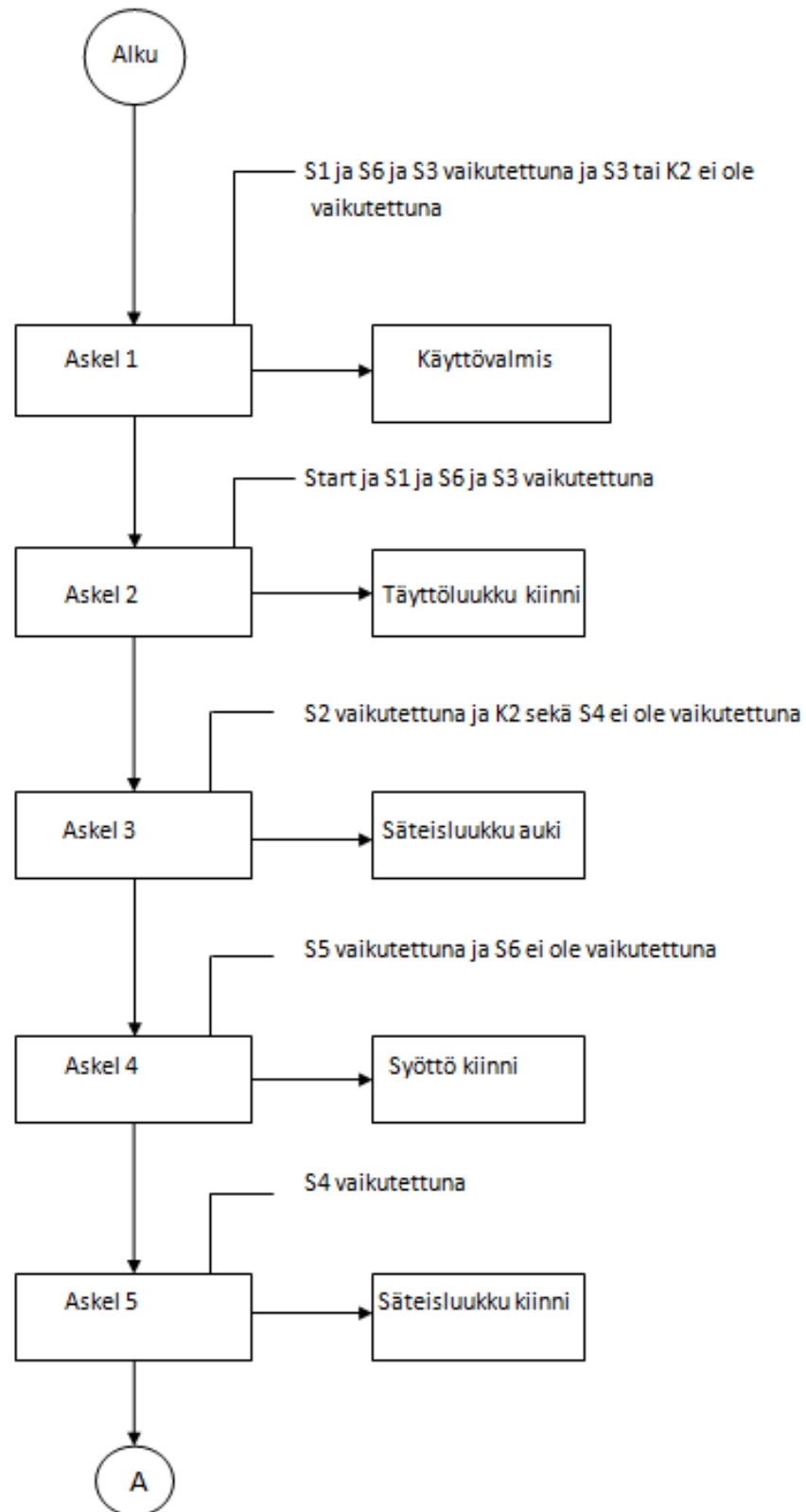
Materiaalin syöttöjärjestelmän hydraulikka- ja releohjauskaavio on esitetty kuvassa 11.

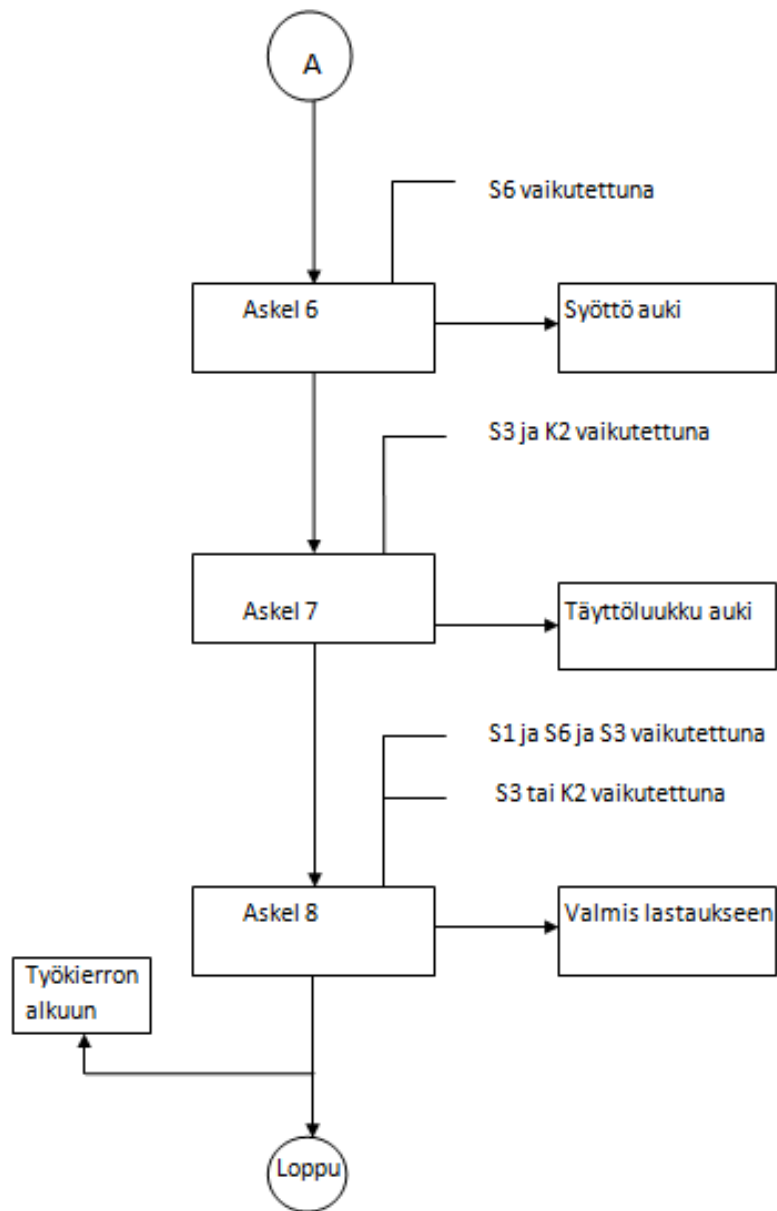
Syöttöjärjestelmän hydraulikka- ja releohjauskaavio



Kuva 11. Hydraulikka- ja releohjauskaavio.

Materiaalin syöttöjärjestelmän toimintakaavio on esitetty kuvassa 12.





Kuva 12. Syötön toimintakaavio.

8.2 Syöttöjärjestelmän käyttöjen mitoitus

Materiaalia hiiletysputkeen syöttävän sylinterin työntövoima voidaan laskea yhtälöstä

$$F_{\mu} = \mu * m * g * \sin(\alpha) + P * A \quad (1.1)$$

jossa F_{μ} = työntövoima
 μ = kitkakerroin
 m = työnnettävä massa
 g = painovoiman kiihtyvyys
 α = kallistuskulma
 P = paine, jota vasten työntö tapahtuu
 A = työnnettävä pinta-ala.

Esimerkiksi arvioidaan kitkakertoimeksi 0,7 ja massaksi 3768 kg. Massa on laskettu käyttäen puun tiheyttä 800 kg/m³ ja tämä on kerrottu hiiletyskattilan tilavuudella, kun halkaisija on 1 m ja putken pituus 6 m. Kallistuskulmaksi valitaan 20 astetta. Kattilassa ei ole painetta työntöhetkellä.

$$F_{\mu} = 0,7 * 3\,768 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 * \sin(20) \approx 8\,850 \text{ N} \quad (1.2)$$

Lasketaan edellinen esimerkki samoilla arvoilla, mutta hiiletyskattilassa on painetta 2 N/mm² eli 20 bar.

$$F_{\mu} = 0,7 * 3\,768 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 * \sin(20) + 2 \text{ N/mm}^2 * 785\,000 \text{ mm}^2$$

$$F_{\mu} \approx 1\,579\,000 \text{ N} \quad (1.3)$$

Laskuista selviää, että pienikin paine aiheuttaa suuria voimia isoilla pinta-aloilla. Työntömekanismi on syytä suunnitella siten, että työntö ei tapahdu painetta vasten, jotta vältettäisiin todella suurten sylintereiden käyttö. Vaihtoehtoisesti hiiletyskattilasta on laskettava paine ulos työntönsä ajaksi tai kattilan rakenne on suunniteltava niin, että paine kompensoidaan myös työntöpuolelle.

Sylinterin halkaisija voidaan laskea yhtälöstä

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_\mu}{P_S \cdot \eta_{syt} \cdot \pi}} \quad (2.1)$$

jossa d_1 = sylinterin sisähalkaisija
 F_μ = sylinterin työntövoima
 P_S = järjestelmän käyttöpaine
 η_{syt} = sylinterin hyötysuhde.

Esimerkiksi lasketaan sylinterin sisähalkaisija, kun sylinterin vaadittu työntövoima on 10 Kn ja järjestelmän käyttöpaineeksi valitaan 21 MPa. Sylinterin hyötysuhde on 0,9.

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 10\,000\,000\,N}{21\,N/mm^2 \cdot 0,9 \cdot \pi}} \approx 26\,mm \quad (2.2)$$

Lasketaan sylinterin sisähalkaisija, kun hiiletyskattilassa on painetta 2 N/mm².

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 1\,579\,000\,N}{21\,N/mm^2 \cdot 0,9 \cdot \pi}} \approx 326\,mm \quad (2.3)$$

Sylinterin männänvarren halkaisija voidaan laskea yhtälöstä

$$\varnothing = \sqrt[4]{\frac{n \cdot Ln^2 \cdot 64 \cdot F_\mu}{\pi^3 \cdot E}} \quad (3.1)$$

jossa \varnothing = männänvarren halkaisija
 n = kerroin 4
 Ln = männänvarren pituus
 F_μ = sylinterin työntövoima
 E = materiaalin kimmokerroin.

Lasketaan esimerkki, kun männänvarren pituudeksi valitaan 500 mm ja materiaalin kimmokertoimeksi 210 GPa.

$$d_2 = \sqrt[4]{\frac{4 * 500^2 \text{ mm}^2 * 64 * 10\,000 \text{ N}}{\pi^3 * 210 * 10^3 \text{ N/mm}^2}} \approx 18 \text{ mm}. \quad (3.2)$$

Jos hiiletyskattilassa on painetta 2 N/mm², niin

$$d_2 = \sqrt[4]{\frac{4 * 500^2 \text{ mm}^2 * 64 * 1\,579\,000 \text{ N}}{\pi^3 * 210 * 10^3 \text{ N/mm}^2}} \approx 63 \text{ mm}. \quad (3.3)$$

Sylinteriksi sopisi yhtälön 1.2 mukaan esimerkiksi 28/20 - 500 tai yhtälön 1.3 mukaan esimerkiksi 350/65 - 500.

Paine sylinterissä voidaan laskea yhtälöstä

$$P_{syl} = \frac{F_{\mu}}{A_{syl}} \quad (4.1)$$

jossa P_{syl} = paine sylinterissä
 F_{μ} = sylinterin työntövoima
 A_{syl} = sylinterin säteittäinen pinta-ala.

Lasketaan esimerkit esimerkkisylintereille.

$$P_{syl} = \frac{10\,000 \text{ N}}{616 \text{ mm}^2} \approx 16 \text{ Mpa} \text{ tai} \quad (4.2)$$

$$P_{syl} = \frac{1\,600\,000 \text{ N}}{96\,200 \text{ mm}^2} \approx 17 \text{ Mpa}. \quad (4.3)$$

Sylinterit tulee valita standardin ISO 6022 mukaan, joka on tarkoitettu alle 25 MPa:n paineille, tai vaihtoehtoisesti sylinterin kokoa kasvattamalla standardin ISO 6020/1, joka on tarkoitettu alle 16 MPa:n paineille.

Sylinterin tarvitsema tilavuusvirta voidaan laskea yhtälöstä

$$q = v * A \quad (5.1)$$

missä q = tilavuusvirta
 v = sylinterin liikenopeus
 A_{syl} = sylinterin säteittäinen pinta-ala.

Lasketaan tilavuusvirta tapauksille, missä voimat olivat 10 Kn ja 1600 Kn, kun sylinterin liikenopeudeksi valitaan 0,2 m/s.

$$q = 2 \text{ dm/s} * 0.0616 \text{ dm}^2 \approx 0.123 \text{ dm}^3/\text{s} \text{ tai} \quad (5.2)$$

$$q = 2 \text{ dm/s} * 9.62 \text{ dm}^2 \approx 19.24 \text{ dm}^3/\text{s}. \quad (5.3)$$

Tilavuusvirta on 7,38 litraa minuutissa tai 1154 litraa minuutissa. Laskelmien perusteella ei ole järkevää suunnitella syöttömekanismia, jossa puristus tapahtuu suurta painetta vasten.

Hydraulipumppu valitaan tilavuusvirran mukaan. Esimerkiksi jos käyttömootori pyörii 1500 rpm, pumpun tuotto yhtä kierrosta kohden olisi n. 4.92 cm^3 . Laskujen perusteella pumpuksi kannattaa valita hammaspyöräpumppu, jonka tuotto on vähintään 8 litraa minuutissa tai 5 cm^3 kierrosta kohden, jos pyörimisnopeus 1500 rpm.

Sylinterin paluunopeus voidaan laskea yhtälöstä

$$v_p = \frac{q}{A_{syl} - A_m} \quad (6.1)$$

missä v_p = sylinterin paluunopeus
 q = tilavuusvirta
 A_{syl} = sylinterin säteittäinen pinta-ala
 A_m = männänvarren säteittäinen pinta-ala.

Lasketaan esimerkki sylinterille 28/20 - 500.

$$v_p = \frac{1.23 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{6.16 * 10^{-4} \text{ m}^2 - 3.14 * 10^{-4} \text{ m}^2} \approx 0.4 \text{ m/s} \quad (6.2)$$

Sylinteri tulee varustaa päätyvaimennuksella kun nopeus on yli 0.1 m/s.

Imuputken halkaisija voidaan laskea yhtälöstä

$$d_{ip} = \sqrt{\frac{4 \cdot q}{\pi \cdot v}} \quad (7.1)$$

missä d_{ip} = imuputken halkaisija
 q = tilavuusvirta
 v = öljyn virtausnopeus.

Lasketaan esimerkki sylinterille 28/20 - 500 kun haluttu öljyn virtausnopeus on 2 m/s.

$$d_{ip} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.23 \cdot 10^5 \text{ mm}^3/\text{s}}{\pi \cdot 2000 \text{ mm/s}}} \approx 8.85 \text{ mm} \quad (7.2)$$

Sopiva imuputki olisi esimerkiksi $\varnothing 12 \times 1.5$, jossa sallittu työpaine on n. 300 bar.

Paluuputken halkaisija voidaan laskea yhtälöistä

$$q_{max} = \frac{A_{syl}}{A_m} \cdot q \quad \text{ja} \quad (8.1)$$

$$d_{pp} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{max}}{\pi \cdot v}} \quad (9.1)$$

joissa d_{pp} = paluuputken halkaisija
 q_{max} = suurin tilavuusvirta
 v = öljyn virtausnopeus
 A_{syl} = sylinterin säteittäinen pinta-ala
 A_m = männänvarren säteittäinen pinta-ala.

Lasketaan esimerkki sylinterille 28/20 - 500.

$$q_{max} = \frac{616 \text{ mm}^2}{314 \text{ mm}^2} \cdot 0.123 \cdot 10^6 \text{ mm}^3/\text{s} \approx 241\,300 \text{ mm}^3/\text{s} \quad (8.2)$$

$$d_{pp} = \sqrt{\frac{4 \cdot 241\,300 \text{ mm}^3/\text{s}}{\pi \cdot 2000 \text{ m/s}}} \approx 12.5 \text{ mm} \quad (9.2)$$

Sopiva paluuputki olisi esimerkiksi $\varnothing 16 \times 1.5$, jossa sallittu työpaine on n. 240 bar.

Säiliön koko valitaan 2 - 3 kertaan pumpun tuotto, jolloin säiliö ei tarvitse erillistä jäähdytystä. Esimerkiksi 24 litran säiliö riittäisi esimerkin järjestelmälle.

Venttiilien valinta laskelmien perusteella.

Paineenrajoitusventtiiliksi koko NS 10, paineensäätöalue 10 - 25 MPa.

Painehäviö tilavuusvirralla $q = 15 \text{ l/min}$ on 0.08 MPa.

Vapaakiertoventtiili sähköohjattu 2/2 koko NS 10, paineensäätöalue 10 - 25 MPa. Painehäviö tilavuusvirralla $q = 15 \text{ l/min}$ on 0.08 MPa.

Suuntaventtiileiksi valitaan sähköohjatut 4/2- venttiilit koko NS 10, paineenkestävyys 25 MPa. Venttiilien puhtausluokka 10 $\beta_{25} = 100$

Käyttömootoriksi esimerkiksi 3-vaiheoikosulkumootori 1500 1/min, eristysluokka F ja suojausluokka IEC 200. Käyttömootorin teho saadaan yhtälöstä

$$P = Q * P / \eta / 60 \quad (10.1)$$

$$P = 8 \text{ l/min} * 21 \text{ Mpa} / 0,55 / 60 \approx 5 \text{ Kw} \quad (10.2)$$

missä $P =$ käyttömootorin teho [Kw]
 $Q =$ pumpun tilavuusvirta [l/min]
 $P =$ järjestelmän paine
 $\eta =$ järjestelmän hyötysuhde.

Koneikkoon on syytä asentaa myös painemittari, 0 - 250 bar, öljyn lämpötilamittari 0 - 150 astetta ja erillinen öljyn suodatin 10 $\beta_{25} = 100$.

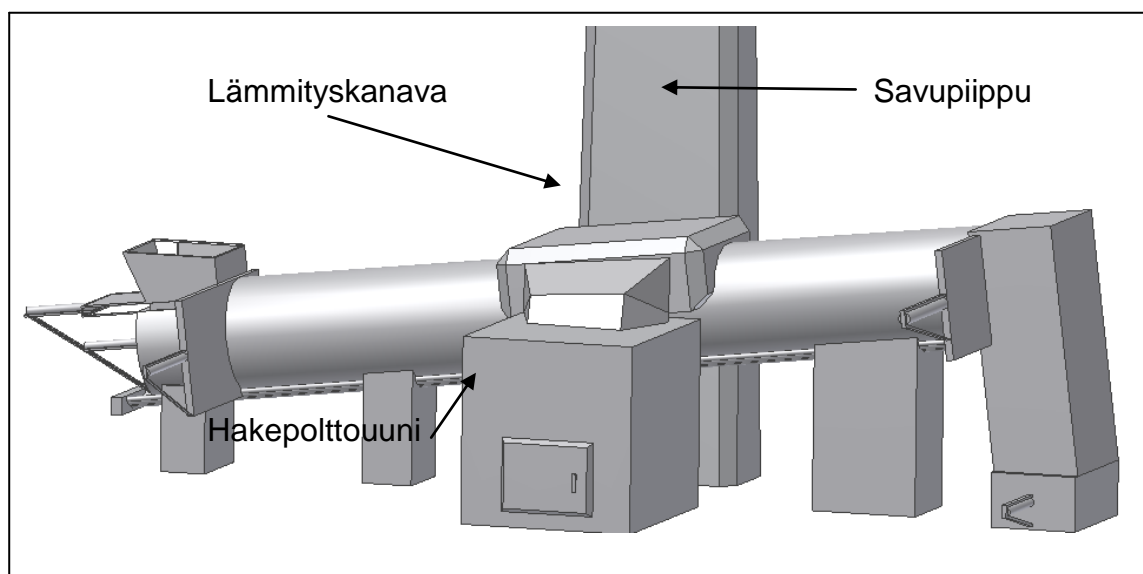
Sylinteri 28/20 - 500 on sopiva vaihtoehto myös täyttöluukun sylinteriksi. Täyttöluukkuun kohdistuu suuria voimia, koska sen on läpäistävä väliin jäävä materiaali. Suuria voimia materiaalin läpäisystä kohdistuu myös säteisluukun sylinterille. Jos säteisluukun sylinterin iskunpituus on 1 m, on valittava isompi sylinteri kuin 28/20 - 1000, koska nurjahduttava voima vaatii n. 25 mm männänvarren halkaisijan. Sopiva valinta on esimerkiksi 35/25 - 1000.

9. TUOTANTOLAITOKSEN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄ

9.1 Hiiletysprosessin lämmitys

Tuotantolaitoksessa palavaa puumurskaa syntyy hiiletettävän raaka-ainepuun pilkkomisessa. Hiiletysprosessissa syntyy myös palavaa hiilimurskaa, joka ei kelpaa grillihiileksi. Puu- ja hiilijätteillä lämmitetään hakepolttouunia, jonka tehtävänä on lämmittää hiiletysprosessia sekä höyryn tuotannossa painekattilaa.

Hiiletysprosessin lämmitys toteutetaan hakepolttouunin savukaasuilla. Hakepolttouuni sijoitetaan halutun lämmityskohdan viereen ja sen savukaasut johdetaan hiiletysputken päältä savupiippuun. Hiiletysputkea lämmitetään yläpuolelta, etteivät pyrolyysiöljyt pala hiiletysputken pohjaan kiinni. Hiiletysprosessin lämmityperiaate on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Hiiletysprosessin lämmitys.

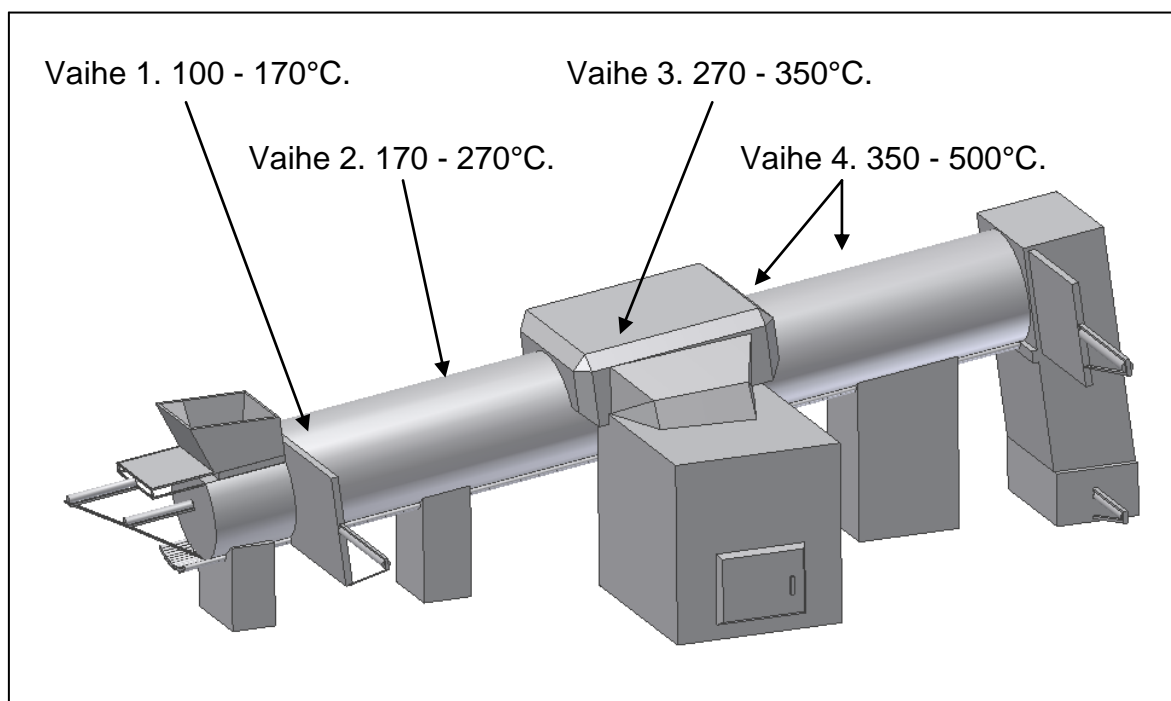
9.2 Puun pyrolysointi hiiletyslaitoksessa

Puun pyrolysointi voidaan lämmityksen kannalta jakaa neljään päävaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on 100 - 170 °C:n lämpötilassa, jolloin puun kosteutena oleva vesi haihtuu. Kun lämpötila kohoaa 160 - 170 °C:seen, poistuu puusta tärpättihöyryä sekä kemiallisesti sitoutunutta vettä. Hiiletysprosessissa ensimmäinen pyrolysoinnin vaihe tapahtuu tuoreimmissa panostuserissä.

Toinen vaihe rajoittuu 170 - 270 °C:n lämpötilaan. 170 °C:ssa puuainees alkaa hajota. Hajoamistuotteina saadaan hiilen oksideja ja vesihöyryä. Toisessa vaiheessa syntyy myös metanolia, etikkahappoa ja asetonia, joita kutsutaan puuhapoksi. Hiiletysprosessissa toinen pyrolysoinnin vaihe tapahtuu panostuserissä, jotka eivät ole vielä prosessin varsinaisessa lämmityskohdassa.

Pyrolysoinnin kolmas vaihe alkaa lämpötilan noustua 270 °C:seen, jolloin puun eksotermisen reaktio alkaa. Eksotermisessä reaktiossa puun hajoaminen tuottaa tarvittavan reaktiolämmön. Puun hiiltyminen tapahtuu suurimmalta osin pyrolyysin kolmannessa vaiheessa, jolloin puusta erottuu myös puuhappoja ja tervaa kaasuihin sekä nesteinä. Puun eksotermisen reaktio jatkuu 350 °C:seen. Hiiletysprosessissa kolmas pyrolysoinnin vaihe tapahtuu hiiletysputken lämmityskohdassa ja sen läheisyydessä.

Neljäs pyrolysoinnin vaihe alkaa 350 °C:ssa, jolloin prosessi vaatii jälleen ulkoista lämmitystä. Viimeisessä vaiheessa puusta poistuu loppu terva ja kaasuja. Hiilen loppulämpötila tervan tuotannossa on 400 - 430 °C. Pyrolyysin viimeinen vaihe tapahtuu hiiletysprosessin lämmityskohdassa ja sen jälkeen. Pyrolysoinnin vaiheet tuotantolaitoksessa on esitetty kuvassa 15.



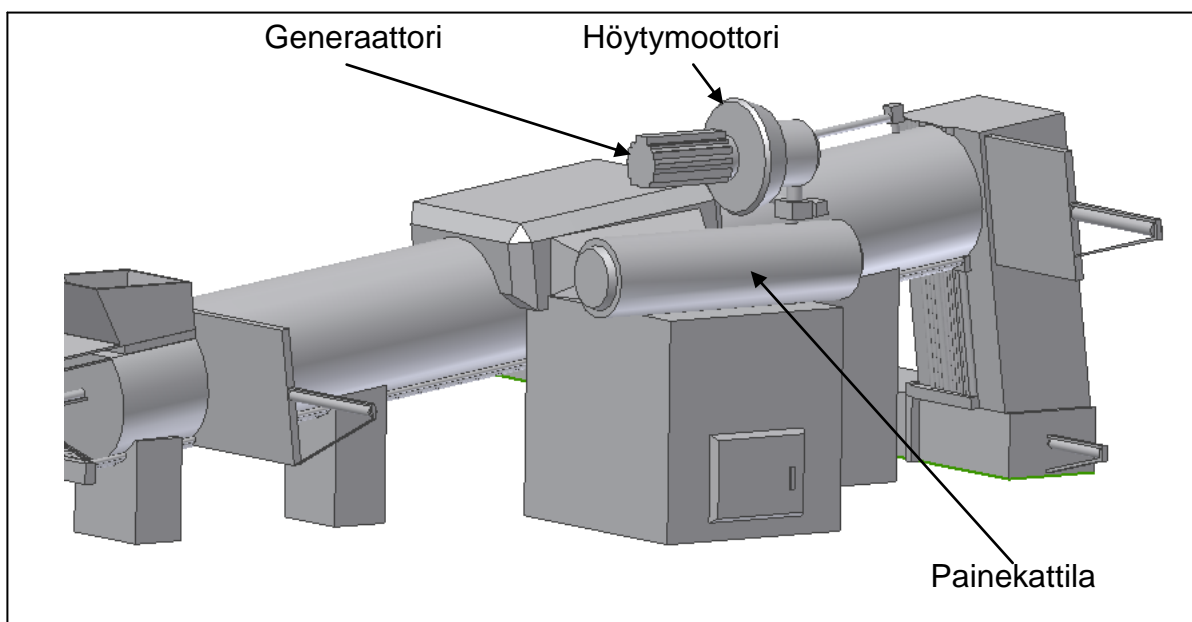
Kuva 15. Hiiletysprosessin pyrolysoinnin vaiheet.

Hiiletystuotantolaitoksessa pyrolysoinnin vaiheet eivät erotu selkeästi toisistaan. Jatkuvan tuotannon takia vierekkäiset vaiheet sekoittuvat osittain keskenään. Tuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa tehtävänä on selvittää paras tuotantonopeus kaikkien vaiheiden toteutuessa.

9.3 Tuotantolaitoksen höyryenergia

Hiiletystuotantolaitoksen toinen tärkeä tuote grillihiilen lisäksi on höyryenergia. Vesihöyryä vapautuu hiiletysprosessissa ja sitä tuotetaan myös painekattilalla, joka sijoitetaan hakepolttokattilan yhteyteen lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Hiiletystuotantolaitoksen muut lämpöhäviöt pyritään poistamaan hyvän eristyksen avulla ja lämpöenergiaa hyödynnetään mahdollisimman hyvin. Lämpöenergiaa pyritään siirtämään tehokkaasti höyrystettävään veteen, raaka-aineiden lämmittämiseen tai mahdollisesti kaukolämpöverkkoon.

Tuotantolaitoksen höyrymoottori sijoitetaan painekattilan yhteyteen. Laitoksen hyötysuhde höyryvoimalaitoksena on hyvä, koska painekattilalle tuotu vesi on valmiiksi suurelta osin höyrystynyttä. Hiiletysprosessista syntynyt vesihöyry sekä jäähtyöksessä käytetty vesi johdetaan pumpulla tulistimien kautta painekattilalle, jonka tehtävänä on nostaa höyryn paine höyrymoottorille sopivaksi. Kuvassa 16 on esitetty höyryenergian tuotantoperiaate laitoksessa.



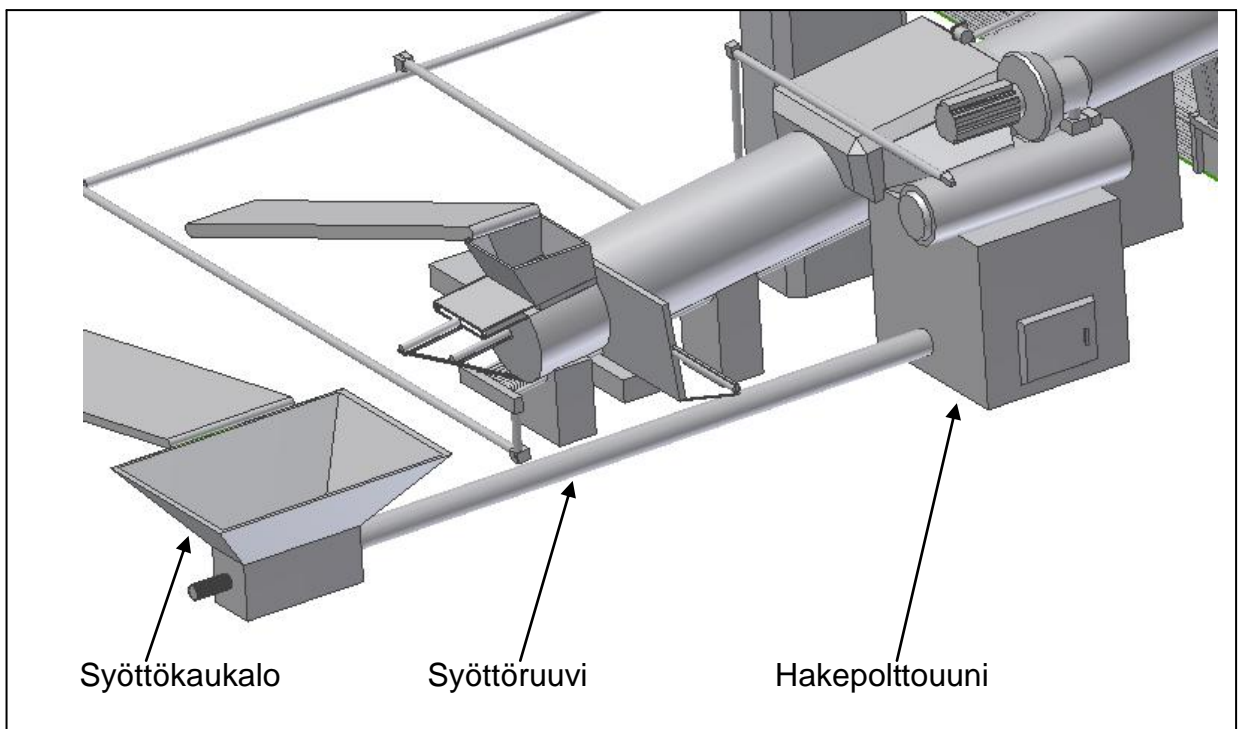
Kuva 16. Höyryenergian tuotanto grillihiilen tuotantolaitoksessa.

Kuvassa 16 ei ole esitetty hiiletystuotantolaitoksen jäähtytystä eikä eristystä. Tuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa ei tule todennäköisesti olemaan erillistä jäähtytystä, koska päätarkoituksena on tutkia hiiltymisprosessia. Eristys ja jäähtytys toteutetaan tutkimustulosten perusteella.

9.4 Hakepolttouuni

Hakepolttouunia lämmitetään hiiletystuotantolaitoksen puu- ja hiilimurskalla ja tarvittaessa valmiilla puulla tai hiilellä. Mahdollisesti lämmityksessä voidaan käyttää hyväksi myös hiiletysprosessissa vapautuvia pyrolyysiöljyjä ja kaasuja. Hakepolttouunin tuottamalla lämpöenergialla lämmitetään hiiletysprosessia sekä painekattilaa. Hiiletystuotantolaitoksen tavoitteena on toimia automaattisesti ja tämä koskee myös hakepolttouunia. Palava materiaali syötetään uuniin spiraaliruuvilla syöttökaukalosta.

Hakepolttouunin materiaalin syöttö on riippuvainen uunin lämpötilasta, jonka avulla syöttöruuvia ohjataan. Hiiletystuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa uunia lämmitetään perinteisin keinoin, kunnes tutkimustulosten perusteella automaatio on suunniteltavissa. Kuvassa 17 on esitetty hakepolttouunin materiaalin syöttöperiaate.



Kuva 17. Hakepolttouunin materiaalin syöttö.

9.5 Tulistin

Tulistin on yleinen höyrykattilakomponentti, jolla höyrystetty vesihöyry lämmitetään höyrystymislämpötilaa korkeampaan lämpötilaan. Tulistin koostuu yleensä teräsputkista, jotka on sijoitettu kuumiin olosuhteisiin. Tuotantolinjassa tulistimia voidaan käyttää hiiletysprosessissa vapautuvan vesihöyryn kuumentamiseen, hiiletysprosessin jäähdytysveden kuumentamiseen sekä höyryturbiinista tulevan viilentyneen höyryn lämmittämiseen ennen uudelleenkäyttöä.

Tulistimien rakenne toimii hiiletystuotantolaitoksessa lämmönsiirtiminä, kun hukkalämpöenergiaa siirretään veteen. Tulistimet toimivat myös painekattilan syöttöveden esilämmittiminä.

9.6 Tuotantolaitoksen jäähdytys

Hiiletysprosessin jäähdytystarvetta on vaikea arvioida ennen ensimmäisen tuotantolaitoksen tutkimustuloksia. Puun eksotermisen reaktion voi nostaa hiiletysputken lämpötilaa niin suureksi, että sitä on jäähdytettävä ulkoisesti prosessin hallittavuuden sekä turvallisuuden takia. Hiiletystuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa ei todennäköisesti toteuteta erillistä jäähdytystä ja ylikuumentamista vältetään puun ylimääräisellä panostuksella. Ylimääräinen puun panostus tuottaa huonolaatuista grillihiiltä, joten erillinen jäähdytys toteutetaan, mikäli ylikuumentamista tapahtuu.

Hiiletysputken pohjaa on jäähdytettävä tervantuotannon takia, koska liian suuret lämpötilat polttavat tervan hiiletysputken pohjaan kiinni. Hiiletystuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa pohjan jäähdytys toteutetaan joko vesijäähdytyksellä tai ilmajäähdytyksellä ja lopulliset valinnat jäähdytystarpeesta tehdään tutkimustulosten perusteella.

Tuotantolaitoksen koneikkojen jäähdytys on tarpeellinen jo ensimmäisessä testiversiossa. Esimerkiksi sähkömoottorien hyötysuhde putoaa nopeasti yli 40 °C:n lämpötilassa, joten ne vaativat erillisen jäähdytyksen, tai vaihtoehtoisesti laitteet on suojattava riittävän hyvin lämpösäteilystä.

Tuotannon nopeuttamiseksi valmiin hiilen jäähdyttäminen vesikierron avulla on kannattavaa, mutta tuotantolaitoksen ensimmäisessä versiossa vesijäähdytystä ei toteuteta.

9.7 Veden ja höyryn syöttöjärjestelmä

Ensimmäisen hiiletyslaitoksen tutkimustulosten perusteella suunniteltu kehittyneempi tuotantolaitos sisältää vesijäähdytyksen ja veden- sekä höyrynsyöttöjärjestelmän. Syöttöjärjestelmän pitää huolehtia automaattisesti sopivasta jäähdytyksestä ja painekattilalle syötetystä vedestä sekä höyrystä. Höyrymoottorin läpi mennyt lauhtunut höyry on kannattavaan käyttää hyväksi, koska se sisältää vielä paljon lämpöenergiaa.

Veden ja höyryn käsittely hiiletystuotantolaitoksessa on iso kokonaisuus, jonka suunnittelu vaatii paljon tutkimustietoa hiiletysprosessin käyttäytymisestä. Hiiletystuotantolaitoksen hyötysuhde kasvaa huomattavasti, kun se toimii myös höyryvoimalaitoksena, joten vesi- ja höyryjärjestelmien suunnittelu on merkittävä osa koko hiiletystuotantolaitosta.

9.9 Lämpöenergian hyötykäyttö

Lämpöenergia pyritään suurimmilta osin siirtämään veteen ja raaka-aineiden esilämmitykseen, joka nostaa hiiletystuotantolaitoksen hyötysuhdetta. Hakepoltouunille syötettävän raaka-aineen sekä ilman esilämmitys parantaa materiaalin syttymistä ja palamista. Lämpöenergiaa on mahdollista siirtää energialaitoksen kaukolämpöverkkoon, mutta mikäli kaukolämpöverkkoa ei ole rakennettu hiiletystuotantolaitoksen läheisyyteen, on sen rakennuttaminen erittäin kallista.

10. JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ja kehittää ideaa automaattisesta ja/tai jatkuvatoimisesta grillihiilen tuotantolaitoksesta. Työ rajattiin hiiletysprosessin seurannan, hiiletystuotantolaitoksen syöttömekanismin ja lämmitysjärjestelmän ideointiin sekä esisuunnitteluun. Työssä perehdyttiin mahdollisten teknologioiden lisäksi puun jalostukseen, puukemiaan ja nykyisin käytössä oleviin liiketoimintamalleihin grillihiilen valmistamisessa.

Kuivatusliiketoiminta oli merkittävää 1800 - 1900-luvulla hiilen ja tervan valmistuksessa, mutta se jouduttiin lopettamaan öljy- ja kivihiihteellisuuden edullisimpien hintojen takia. Tästä syystä viime vuosikymmenien ajan puunjalostus on keskittynyt suurimmilta osin sahatavaratuotantoon, sellun sekä paperin valmistukseen ja T&K-toiminta on suunnattu näihin suuriin massatuotteisiin. Fossiilisten raaka-aineiden edullisuus johti kuivatusmenetelmien väheksymiseen, minkä seurauksena myös tutkimustuloksia kuivatusaihealueesta on niukasti. Opinnäytetyön paras ja kattavin lähdeaineisto oli Talvitien teos, Puun hiilto ja Hartsin valmistus, joka on julkaistu vuonna 1924.

Nykyiset tutkimukset ilmaston lämpenemisestä kasvihuonekaasujen takia on johtanut ympäristöystävälliseen ideologiaan, jonka mukaan fossiilisten raaka-aineiden käyttö lisää kasvihuonekaasuja ja uusiutuvat luonnon raaka-aineet noudattavat luonnon kiertokulkua lisäämättä kasvihuonekaasuja. Tämän seurauksena poliittiset ohjaukset ovat nostaneet fossiilisten raaka-aineiden hintoja ja puolestaan helpottaneet uusiutuvien käyttöönottoa mm. verohelpotuksin. Ympäristöystävällisyyden myötä luonnon raaka-aineita on aloitettu jälleen hyödyntää uusina tuotteina ja fossiilisten raaka-aineiden korvaajina, ja tämän ansiosta myös grillihiilen valmistaminen suomalaisesta puuraaka-aineesta on kiinnostava aihealue.

Automaattisesti tai jatkuvasti toimivan grillihiilen tuotantolaitoksen ideointi ja kehittäminen osoittautui niin isoksi työksi, että opinnäytetyössä tehdyt ehdotukset ovat vain ehdotuksia ja tuskin kovinkaan lähellä parhaita ratkaisuja kaupallistettavaksi.

Tutkimusten perusteella hiiletysprosessin ohjaus olisi parasta tehdä lämpötilan ja paineiden avulla. Lisätietoa prosessin etenemisestä saadaan esimerkiksi virtausmittareilla, joilla seurataan mm. höyryjen ja nesteiden tuottoa. Suuremmat kysymykset seurannan kannalta ovat mitä ja miten paljon mitäkin kaasua ja nestettä prosessi tuottaa.

Syöttömekanismiksi valittiin sylinteritoiminen järjestelmä, joka osoittautui ideatasolla parhaaksi ratkaisuksi raaka-aineen liikuttamiseen ja tiivistyksen toteuttamiseen. Sylinterimekanismin suunnittelu ja toteutus on koneinsinöörille normaali työsuoritus, mutta suurin haaste on tiivistyksen ja materiaalien keston mitoitus, kun ei tiedetä tarkemmin, mitä ja miten paljon kaasuja ja nesteitä prosessissa syntyy.

Ulkoiseksi varalämmitysjärjestelmäksi valittiin hakepolttuuni, jossa voisi polttaa myös prosessissa syntyviä muita energiapitoisia jakeita, kaasuja, nesteitä ja hiiltä. Uunin suunnittelu olisi myös helposti toteutettavissa, jos tiedettäisiin lämmitystarve ja mitä muita poltettavia jakeita prosessissa syntyisi.

Jatkuvatoimisen grillihiilen tuotantolaitoksen kaupallistaminen vaatii vielä huomattavasti suuremman tuotekehitysprojektin markkinatutkimuksineen, joissa ensin tutkittaisiin ja mitattaisiin pyrolyysiprosessin eri vaiheita lähtöarvojen aikaansaamiseksi. Prosessin mallintaminen mahdollistaisi oikean testilaitteen suunnittelemisen, kun tiedetään, mitä ja kuinka paljon kaasuja, nesteitä ja hiiltä syntyy. Testilaitteen mittausten ja käyttökokemusten perusteella voisi ideoida jatkuvatoimisen ja automaattisen tuotantolaitoksen suunnittelua ja toteutusta, jos se näyttäisi liiketoiminnan kannalta kannattavalta.

Opinnäytetyö oli kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelmaan sopiva tuotekehitysharjoitus, joka kartutti insinööritaitoja ja varsinkin insinööritaitojen kohdentamista oikeisiin asioihin liiketoiminnan kannalta.

LÄHTEET

1. Talvitie, Y. (1924). Puun hiihto ja Hartsin valmistus. WSOY. Porvoo.
2. Impola, K. (2009). Hidaspyrolyysi-liiketoiminnan mahdollisuudet maaseudulla. Taloustieteenlaitos. Helsinki.
3. Arpinen, V. (1984). Puun- ja turvehiilen valmistus ja niiden tuotanto kehitysmaissa. VTT. Espoo.
4. Alakangas, E. (2000). Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT. Espoo.
5. SFS 3273 - 3275. (2008). Paineastian mitoitus. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki.
6. Painelaitelaki, (869/1999), (890/1999), (891/1999), (917/1999), (938/1999), (953/1999). Turvatekniikan keskus TUKES. Helsinki.
7. SFS 10028-2 (2009). Painelaiteteräkset. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki.
8. SFS-EN 10027-1, SFS-EN 10028-2, SFS-EN 10207. (2008) Paineastia teräkset. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki.
9. SFS-EN 10028. (2009). Painelaiteteräkset. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki.
10. SFS-EN 60 529. (2010). Koneturvallisuus. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki.
11. ATEX-olosuhdedirektiivi 1999/92/EY. Turvatekniikan keskus TUKES. Helsinki.
12. IEC 60079, SFS-EN 60079-14, SFS-EN 60079-17. (2008). Räjähdyksvaaralliset tilat. Turvatekniikan keskus TUKES. Helsinki.
13. Paajala, J. (1989). Tervan valmistus ja käyttö. Pohjois-Suomen tutkimuslaitos. Oulu.
14. Kupiainen, P. (2008). Koneautomaation anturitekniikka 2. Savonia-ammattikorkeakoulun kurssimateriaali. Kuopio.
15. Mäkelä, M. (2005). Tekniikan kaavasto. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. Hämeenlinna.
16. Kupiainen, P. (2008). Koneautomaation anturitekniikka 2. Savonia-ammattikorkeakoulun kurssimateriaali. Kuopio.
17. Rönkä, R. (2008). Koneautomaation hydraulijärjestelmät. Savonia-ammattikorkeakoulun kurssimateriaali. Kuopio.