

LYHENTEET JA SYMBOLIT.....	5
1 JOHDANTO.....	6
KIRJALLISUUS OSA.....	7
2 LASERIN HISTORIAA	7
3 LASERTEKNIIKAN PERUSTEET.....	8
3.1 Laservalon muodostuminen	8
3.1.1 Stimuloitu emissio.....	8
3.1.2 Populaatioinversio.....	9
3.1.3 Resonaattori	12
3.2 Laservalon ominaisuudet.....	13
3.2.1 Monokromaattisuus.....	13
3.2.2 Koherenssi.....	14
3.2.3 Kollimaatio	14
3.2.4 Teho	15
3.2.5 Tehotiheys.....	16
3.2.6 Polarisatio.....	16
3.2.7 Moodi.....	17
3.3 Työstolasereiden päätyypit.....	18
3.3.1 CO ₂ -laser.....	18
3.3.2 Nd:YAG laser	22
3.4 Lasertyöstölaitteisto	23
3.4.1 Säteen kuljetus ja fokusointi.....	24
3.4.1.1 Peilit	24
3.4.1.2 Säteen fokusointi	24
3.4.1.3 Säteenjakajat	27
3.4.1.4 Kuituoptiikka.....	29
3.4.2 Leikkauspää	30
3.4.3 Leikkauskaasut.....	30

3.4.4	Työkappaleen ja leikkauspään välinen liike	31
4	PAPERIN JA KARTONGIN LASERLEIKKAUS	32
4.1	Tekniset ja taloudelliset perusteet laserleikkaukselle	33
4.1.1	Perinteisten leikkausmenetelmien ongelmat	33
4.1.2	Digitaalinen painatus ja laserleikkaus.....	34
4.1.3	Laserleikkauksen hinta	36
4.2	Kuitumateriaalin leikkauksessa käytettävät laserit	36
4.2.1	CO ₂ -laser	36
4.2.2	Ti:safiirilaser	37
4.2.3	Nd:YAG ja Excimer.....	38
4.3	Paperin ja kartongin laserleikkauksen sovellukset.....	38
4.3.1	Pituusleikkaus	38
4.3.2	Perforointi	40
4.3.3	Aukaisu-uran valmistus	40
4.3.4	Laser kiss cutting.....	42
4.3.5	Nuuttaus	43
4.4	Laserparametrien merkitys paperin ja kartongin leikkauksessa	43
4.4.1	Laserteho.....	43
4.4.2	Lasersäteen fokusointi	47
4.4.3	Leikkaussuuttimen asema.....	48
4.4.4	Leikkauskaasu ja sen paine	49
4.4.5	Moodi.....	53
4.5	Materiaalin vaikutus paperin ja kartongin laserleikattavuuteen.....	54
4.5.1	Leikattavan materiaalin paksuus, neliömassa ja tiheys	54
4.5.2	Päällysteen vaikutus paperin ja kartongin laserleikattavuuteen	56
4.5.3	Materiaalin kuiva-ainepitoisuus	58
4.5.4	Kuitumateriaalin laadun vaikutus laserleikattavuuteen.....	59
4.6	Laserleikkauksen vaikutus paperin ja kartongin ominaisuuksiin	60
4.7	Paperin ja kartongin laserleikkauksessa syntyvät pölyt ja kaasut	63

5 TÄYTE- JA PÄÄLLYSTEPIGMENTIT PAPERIN JA KARTONGIN VALMISTUKSESSA.....	64
5.1 Täyteaine vs. päällystyspigmentti	65
5.2 Tärkeimmät täyte- ja päällystepigmentit	65
5.2.1 Kalsiumkarbonaatti	65
5.2.2 Kaoliini	68
5.2.3 Muita täyte- ja päällystyspigmenttejä	70
6 PAPERIN JA KARTONGIN TÄYTTÖ.....	72
6.1 Täyteaineiden vaikutus paperin ja kartongin ominaisuuksiin	72
6.2 Täyteaineiden vaikutus paperin ja kartongin valmistusprosessiin	73
7 PAPERIN JA KARTONGIN PÄÄLLYSTYS	74
7.1 Päällystykseen tarkoitus.....	74
7.2 Päällystyspastan komponentit	75
8 PAPERIN JA KARTONGIN POLTTO.....	76
8.1 Joidenkin paperin ja kartongin valmistuksessa käytettävien materiaalien reaktioita korkeissa lämpötiloissa.....	77
8.1.1 Paperin ja kartongin syttymislämpötila	77
8.1.2 Kalsiumkarbonaatin reaktiot	77
8.1.3 Kaoliinin reaktiot	79
8.2 Paperin poltossa syntyvät päästöt.....	80
KOKEELLINEN OSA.....	82
9 TYÖN TAVOITTEET JA TARKOITUS	82
10 KÄYTETYT MATERIAALIT JA MENETELMÄT.....	82
10.1 Käytetyt materiaalit.....	82
10.2 Koelaitteisto	83
10.3 Koesuunnitelma	85

10.4	Leikkausten toteutus.....	88
10.5	Leikattujen materiaalien analysointi.....	90
11	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU	91
11.1	Päällystämisen vaikutus polttopisteen paikkaan.....	91
11.1.1	Päällysteen määrän vaikutus polttopisteen paikkaan	92
11.2	Päällystämisen vaikutus lasertehoon ja leikkausnopeuteen	95
11.2.1	Päällysteen määrän vaikutus leikkausnopeuteen	95
11.2.2	Päällystepigmentin vaikutus leikkausnopeuteen.....	103
11.3	Päällystyksen vaikutus leikkausuran muotoon ja reunan vaaleuteen	105
11.4	Laserleikkauksissa syntyvän pölyn määrä.....	109
11.4.1	Pölyn määrä ja leikkausuran leveys vakioleikkausnopeudella.....	109
11.4.2	Lasertehon ja leikkausnopeuden vaikutus syntyvän pölyn määrään	111
11.5	Päällystettyjen kartonkien laserleikkauksessa syntyvät savut.....	112
11.6	Prosessiparametrien vaikutus päällystettyjä materiaaleja leikattaessa	115
11.6.1	Leikkauskaasun paineen vaikutus leikkausnopeuteen	115
11.6.2	Leikkauskaasun laadun vaikutus leikkausnopeuteen	117
11.6.3	Sivupuhalluksen vaikutus leikkausnopeuteen.....	119
11.6.4	Leikkaussuuttimen aseman vaikutus leikkausnopeuteen	121
11.6.5	Leikkaussuuttimen reiän halkaisijan vaikutus leikkausnopeuteen	123
11.6.6	Polttopisteen paikka leikattaessa suurella teholla	123
11.7	Leikkaustapahtuman kuvaaminen suurnopeuskameralla	125
12	VIRHEARVIOITA	128
13	JOHTOPÄÄTÖKSET	129
14	JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET.....	132

LYHENTEET JA SYMBOLIT

LYHENTEET

CMC	Karboksimetyyliselluloosa
CTMP	Kemitermomekaaninen hierre
CW	Continuous Wave
CWF	Coated wood free
GCC	Jauhettu kalsiumkarbonaatti
KAP	Kuiva-ainepitoisuus
PAH	Polyaromaattinenhiilivety
PCC	Saostettu kalsiumkarbonaatti
PCDD	Polykloorattu dibentsodioksiini
PCDF	Polykloorattu dibentsofuraani
PVA	Polyvinyylialkoholi
PVAc	Polyvinyyliasetaatti
PVC	Polyvinyylikloridi
SB	Styreenibutadieeni
SEM	Pyyhkäisyelektronimikroskooppi
TEM	Transverse Electromagnetic Mode

SYMBOLIT

E	Energia	, J
d_{foc}	Fokusoidun säteen halkaisija	, mm
f	Taajuus	, Hz
F	Polttoväli	, mm
h	Plancin vakio	, $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js
K	K-luku	, -
MOH	Aineen kovuus	, -
pH	Happamuus	, -
λ	Aallonpituus	, μm

1 JOHDANTO

Laserleikkauksen yhdistämistä paperin ja kartongin valmistamiseen ja jatkojalostamiseen on tutkittu jo 25 vuotta. Vaikka laserleikkauksella on mekaaniseen leikkaukseen verrattuna näiden tutkimusten mukaan etuja, on teknologian käytännön soveltamisen esteeksi aina noussut sen korkea hinta joitakin harvoja sovelluksia lukuun ottamatta. Lasertekniikan jatkuvan kehityksen ja hintojen halpenemisen seurauksena on kiinnostus tekniikan hyödyntämiseen lisääntynyt paperiteollisuudessa. Halpenemisesta huolimatta lasertekniikka on vielä melko kallis ratkaisu esim. paperin ja kartongin pituusleikkauksen kaltaisiin bulkkituotannon sovelluksiin. Sen sijaan erilaisten, suhteellisen kalliiden, kappaleiden muotoon leikkaamisessa laserleikkaus yhdistettynä työstökoneiden digitaaliseen ohjaukseen on erityisen kiinnostavaa.

Tämä diplomityö on osa laajempaa projektia, jonka tarkoituksena on selvittää tarkemmin paperin ja kartongin laserleikkauksen mahdollisuuksia. Aiemmissa projektiin liittyvissä tutkimuksissa on todettu päällystyksen vaikuttavan merkittävästi paperin ja kartongin laserleikkaukseen. Tämän diplomityön tarkoituksena onkin selvittää päällystyksen vaikutusta paperin ja kartongin laserleikattavuuteen. Aiheeseen liittyy myös laserparametrien vaikutuksen ymmärtäminen leikattaessa päällystettyjä laatuja.

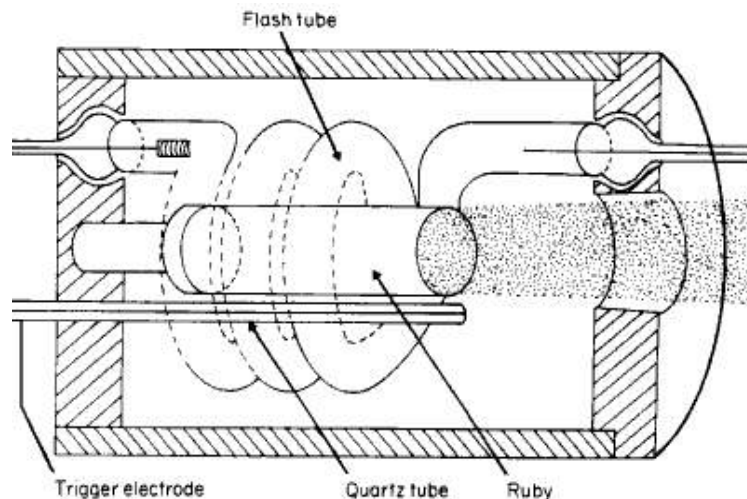
Diplomityön kirjallisuusosassa tutustutaan hieman lasertekniikkaan sekä sen sovellusmahdollisuuksiin paperin ja kartongin tuotannossa ja jatkojalostuksessa. Kirjallisuusosassa tutustutaan lyhyesti myös paperin ja kartongin päällystykseen ja täyttöön. Koska laserleikkaus on luonteeltaan terminen tapahtuma, on tässä tehty lisäksi pieni katsaus paperin ja kartongin polttoon ja sitä kautta muodostuviin kaasuihin.

KIRJALLISUUS OSA

2 LASERIN HISTORIAA

Vuonna 1917 Albert Einstein loi teorian stimuloidusta emissiosta, joka myöhemmin mahdollisti laserin keksimisen. Nimi **LASER** on lyhenne sanoista **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Eli valon vahvistus viritetyn säteilypurkauksen, stimuloitun emission, avulla./1/

Vuonna 1954, Charles Townes and Arthur Schawlow keksivät mikroaaltoalueella toimivan laserin eli maserin. Ensimmäisen näkyvän valon alueella toimivan varsinaisen laserin kehitti Theodore Maiman vuonna 1960. Maimanin laser koostui rubiinikiteestä, jonka ympärille oli kiedottu purkauslamppu. Aluksi kiinteä aine, rubiini, laserin väliaineena herätti ihmetystä, sillä kaasun ajateltiin soveltuvan parhaiten laseroivaksi väliaineeksi. Tämän jälkeen laseroivia väliaineita on löydetty kymmeniä./1,2/



Kuva 1. Kaaviokuva Maimanin rubiinilaserista./2/

Vain muutaman kymmenen vuoden aikana laserlaitteet ovat kehittyneet teorioista satojen sovelluskohteiden tarkkuustyökaluksi. Laseria voidaan käyttää mm. materiaalin työstössä, lääketieteessä, viihteessä, sotilassovelluksissa, viestinnässä, kemian tutkimuksessa ja erilaisissa mittauksissa. /3/

3 LASERTEKNIIKAN PERUSTEET

3.1 Laservalon muodostuminen

3.1.1 Stimuloitu emissio

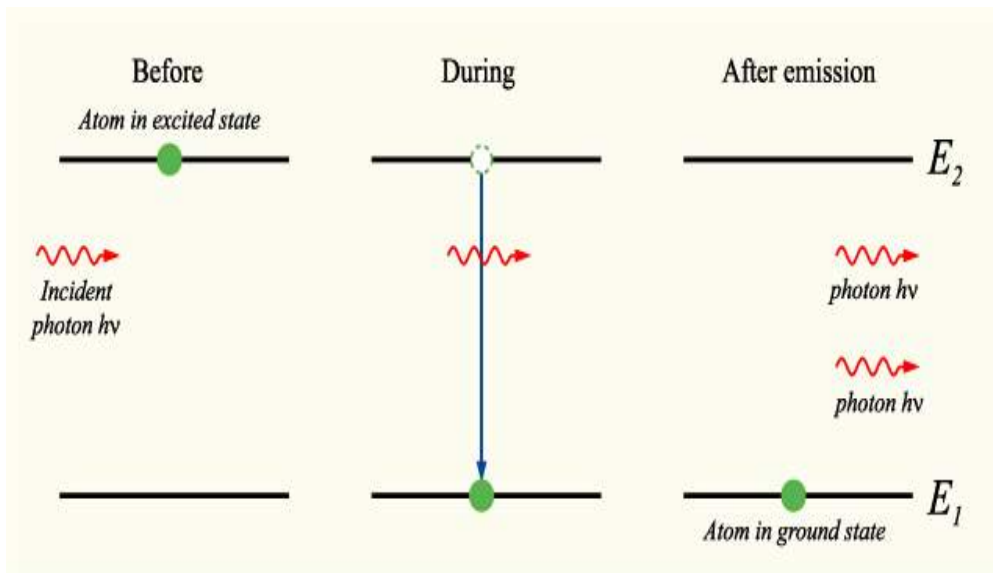
Kaikkien aineiden atomeille on tyypillistä, että atomin elektronit voivat jakautua ytimen ympärille usealla, kyseiselle atomille ominaisella tavalla. Jokaista jakaumaa vastaa täysin määrätty energiatila. Sitä tilaa, jota vastaa energian minimi, kutsutaan perustilaksi. Fysiikassa varsin yleisen periaatteen mukaan systeemi, tässä tapauksessa atomi, pyrkii aina tilaan, jossa energialla on minimiarvo. Normaalisti atomi on siis perustilassa. Tuomalla atomille sopiva määrä energiaa se saadaan kuitenkin siirtymään hetkeksi muihin, ns. viritettyihin tiloihin. Fysiikan slangilla tätä atomien viritämistä kutsutaan pumppaamiseksi. Tämä voi tapahtua esim. kuumentamalla, sähköpurkauksien avulla tai sähkömagneettisen säteilyn avulla. Pumppaamisen tapahtuessa sähkömagneettisen säteilyn avulla atomi virittyessään ottaa vastaan sähkömagneettisen säteilyn yhden kvantin, fotonin. Atomin virittyessä on voimassa yhtälö (1)

$$E_1 - E_0 = hf \quad (1)$$

jossa	E_0	atomin perustilaa vastaava energia
	E_1	virittyneen tilan energia
	f	viritykseen käytetyn säteilyn taajuus
	h	Plancin vakio.

Kun atomi palaa takaisin perustilaan, emittoituu viritysentenergiaa vastaava fotoni. Suuri joukko atomeja, jotka jollakin tavalla on ensin viritetty, lähettää siis sähkömagneettista säteilyä, jonka sisältämät aallonpituudet ovat ehdon (1) määrittämiä ja siten juuri kyseiselle atomille tyypillisiä. Tässä yhteydessä erittäin tärkeä on kvanttimekaniikan ennustama tosiasia: virittyneen tilan laukeaminen voi tapahtua kahdella tavalla, spontaanisti (omia aikojaan) tai toisen oikean taajuisen fotonin laukaisemana

(indusoimana, stimuloimana). Virittyneen tilan lauetessa spontaanisti emittoituvan fotonin vaihekulma ja polarisaatiosuunta ovat täysin riippumattomia muiden atomien emittoimien fotonien vaiheesta ja polarisaatiosta. Stimuloidussa emissiossa virittyneeseen atomiin osuu fotoni, jonka taajuus f on virittyneen tilan energiatasoa vastaava täyttäen yhtälön (1) asettaman ehdon. Virittynyt tila putoaa alemmalle energiatasolle ja emittoituvan fotonin taajuus, vaihe ja kulkusuunta on sama kuin laukaisevan fotonin, joka myös jatkaa kulkuaan. (kuva 2) /4,5,6/



Kuva 2. Stimuloidun emission periaate./7/

Energiaa purkautuu atomista ja se ilmenee lisääntyneenä valona. Valon intensiteetti siis vahvistuu, koska myös virittyneen tilan laukaissut valo (fotoni) on jäljellä. Tästä periaatteesta tulee nimi LASER, eli valon vahvistus stimuloidun emission avulla. Tämä prosessi ei ole vallitseva atomireaktio, mutta se on kuitenkin lasersäteilyn synnyn perusta. Lasersäteily syntyy energian vaihdosta virittyneen tilan ja alemman energiatason välillä./4,5,6/

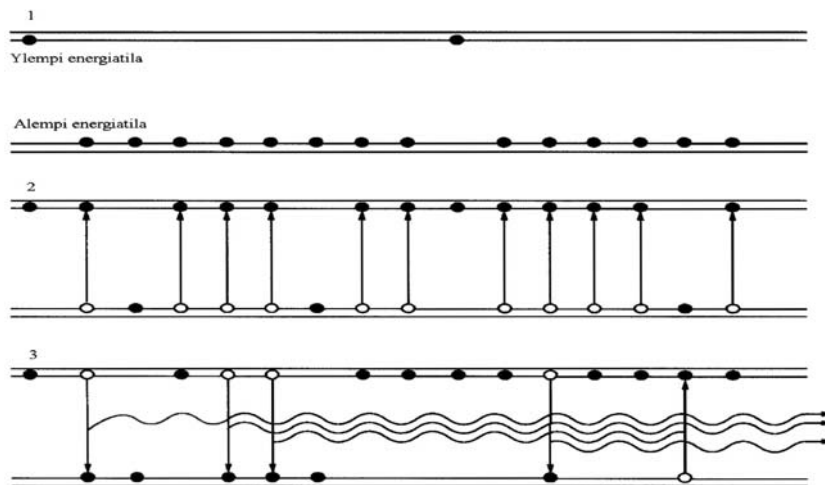
3.1.2 Populaatioinversio

Normaali tilanne atomijoukossa on sellainen, että vain pieni osa atomeista on virittyneessä tilassa valtaosan ollessa perustilassa. Tästä johtuu, että stimuloitu emissio on normaalisti hyvin harvinainen ilmiö. Lähes kaikki atomiin saapuvat fotonit

aiheuttavat absorptioon yhtälön (1) mukaisesti. Laserin kannalta keskeinen ongelma onkin; kuinka tehdä stimuloitu emissio vallitsevaksi absorptioon nähden./4/

Lisäehtona laservalon syntymiselle onkin populaatioinversio eli käänteinen miehitys, missä aineen atomeista suurempi osa on virittyneessä tilassa kuin perustilassa. Tämän saavuttamiseksi virittyneen tilan eliniän pitää olla suurempi kuin perustilan./5/

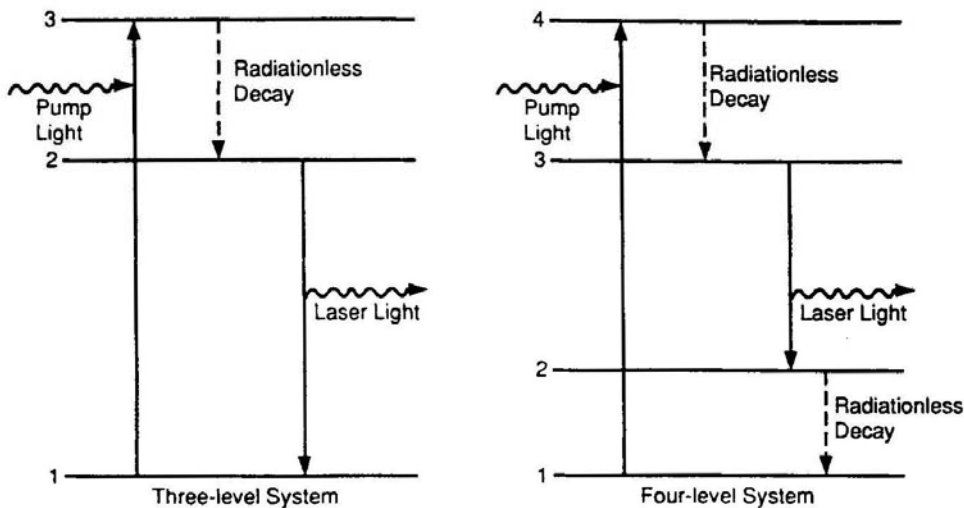
Populaatioinversio voidaan saada aikaan tuomalla atomin elektroneille ulkopuolista energiaa, joka nostaa ne ylemmälle energiatasolle. Tämä energiataso on yleensä korkeampi kuin mitä varsinaisen laservalon tuottamiseksi tarvittava energiataso. Atomin energiatason nostoa kutsutaan pumppaukseksi. Yleisimmät menetelmät populaatioinversion aikaansaamiseksi ovat optinen kiihdytys valonlähteellä, elektronien törmäily kaasussa tai energian siirto toisten molekyylien välityksellä. Yksinkertaisimmillaan nämä voivat olla salamavalo, kuten Maimanin rubiinilaserissa tai samanlainen sähköpurkaus kuin esim. neonvaloissa./4,5/



Kuva 3. Populaatio inversion periaate. 1) Suurin osa atomeista perustilassa 2) Käänteinen populaatio esim. sähköpurkauksen avulla 3) Stimuloitu emissio vallitseva absorptioon nähden./8/

Populaatioinversiota on mahdotonta saada aikaan järjestelmässä, jossa on vain kaksi energiatasoa. Yleensä laseroivassa materiaalissa on monia energiatasoja, mutta vain kolme tai neljä niistä on käytössä laservalon synnyttämiseksi. Lasermateriaalit jaotellaankin useimmiten kolmi- tai nelitasoisiksi järjestelmiksi. Tunnusomaista

kolmitasoiselle järjestelmälle on, että stimuloitun emission päättötaso on sama kuin atomin energian perustaso (kuva 4.). Nelitasoisessa järjestelmässä stimuloitun emission energian päättötaso on korkeammalla kuin energian perustaso./6/



Kuva 4. Kaaviokuva kolmi- ja nelitasoisesta laseremissiojärjestelmästä./6/

Kolmitasoisessa järjestelmässä atomin energia nostetaan (pumpataan) tasolle 3 valolla, jonka taajuus f_3 voidaan kirjoittaa yhtälön (2) mukaan

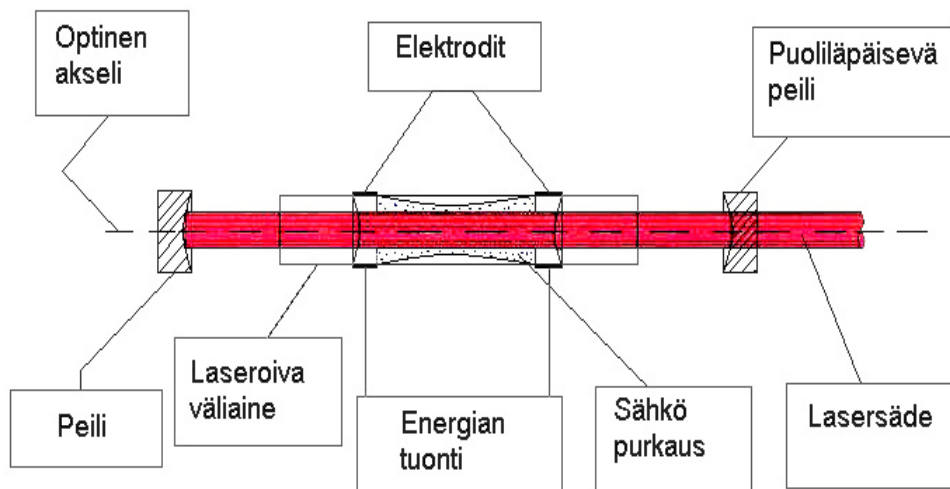
$$f_3 = (E_3 - E_1)/h \quad (2)$$

Tasolta 3 atomin energia putoaa tasolle 2 nopealla säteilyttömällä siirtymällä. Tasojen 3 ja 2 välinen energia emittoituu lämpönä. Tasolta 2 atomin energia putoaa perustasolle stimuloitulla emissiolla. Kolmitasoisessa järjestelmässä atomiin täytyy tuoda merkittävästi energiaa taajuudella f_3 , jotta tason kolme miehitys saadaan suuremmaksi kuin tason 1. Nelitasoinen järjestelmä tarvitsee vähemmän energiaa populaatioinversion saavuttamiseksi. Niinpä se onkin halutumpi järjestelmä laservalon tuottamiseksi./6/

Käänteisen populaation jälkeen tapahtuva stimuloitu emissio saa aikaan kokonaisen tahdistettujen fotonien vyöryn. Vielä nämäkään vyöryt eivät kuitenkaan riitä varsinaisen lasertoiminnan synnyttämiseen, sillä ne tapahtuvat aluksi vielä hajanaisesti ja satunnaisesti suuntiin./4/

3.1.3 Resonaattori

Viimeinen vaatimus laserin toiminnalle on resonaatiokammio eli optinen resonaattori. Resonaattori muodostuu kahdesta vastakkain asetetusta peilistä, joista toinen on täysin heijastava ja toinen päästää osan valosta läpi. Fotonit heijastuvat peileistä kulkien edestakaisin niiden välillä laseroivan väliaineen läpi. Fotonien edestakainen liike saa aikaa uusia stimuloituja emissioita ja lopulta valtava määrä tahdistettuja fotoneja on liikkeellä peilien akselin suunnassa. Osa niistä vuotaa ulos puoliläpäisevästä peilistä synnyttäen tahdistetun monokromaattisen suihkun eli laservalon. Peilien väliin muodostuu interferenssin vaikutuksesta seisova aaltoliike, jossa alunperinkin kapeasta aallonpituusalueesta vain määrätty aallonpituus vahvistuu muiden kuollessa pois. Ilmiö on täysin analoginen värähtelevissä kielissä ja ilmapatsaissa tapahtuvan resonanssi-ilmiön kanssa./4,6/



Kuva 5. Resonaattorin periaate./9/

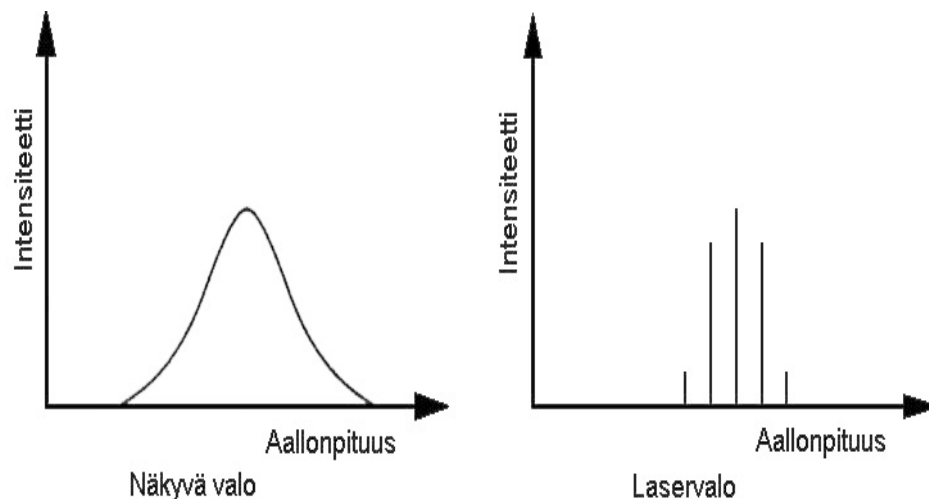
Ensimmäisissä resonaattoreissa käytettiin tasopeilejä. Pian kuitenkin huomattiin, että vaihtamalla peilit pallonmuotoisiin saatiin lasersäteen vakautta lisättyä. Pieni tasopeilien suuntausvirhe tai värähtely saattoi aiheuttaa säteen siirtymistä pois optiselta akselilta. Nykyään erilaisia peiliratkaisuja on useita./6/

3.2 Laservalon ominaisuudet

Laserein käyttökelpoisuus eri sovelluksissa perustuu laservalon erikoisiin ominaisuuksiin, jotka poikkeavat tavanomaisten valonlähteiden lähettämästä valosta. Tavallinen valkosta valoa lähettävä valonlähde, esim. normaali hehkulamppu, säteilee fotoneja kontrolloimattomasti joka suuntaan ja sen valossa on useita eri aallonpituuksia. Tällainen valo on epäkoherenttia, polykromaattista (moniväristä) ja sillä on suuri divergenssi. Laservalon ominaisuuksiin kuuluu mm. monokromaattisuus (spektrin viiva kapea), koherenttisuus, hyvä kollimaatio ja fokuusoitavuus. Kaikki nämä ominaisuudet riippuvat vahvasti toisistaan, mutta seuraavissa kappaleissa niitä on kuitenkin käytännöllistä käsitellä omina alueinaan./6/

3.2.1 Monokromaattisuus

Laservalo on äärimmäisen monokromaattista (yksiväristä) eli se sisältää vain yhtä tai korkeintaan muutamaa aallonpituutta. Aallonpituus on laseroivasta aineesta riippuvainen. Kapea aallonpituusalue tarkoittaa myös sitä, että sen mitattu spektriviiva on hyvin kapea. Spektrin leveys on toki nollaa suurempi, mutta kuitenkin paljon kapeampi kuin tavanomaisella valolla. (kuva 6) Joidenkin laskelmien mukaan spektrin leveys voisi olla vain jopa hertsin murto-osan luokkaa. Käytännössä se kuitenkin on jonkin verran leveämpi./6,8,10/



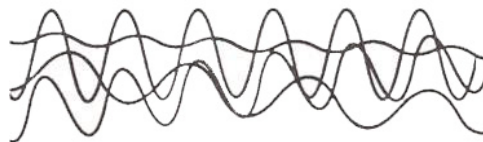
Kuva 6. Näkyvän valon ja laservalon spektrit./8/

3.2.2 Koherenssi

Ajallinen ja avaruudellinen koherenssi viittaa elektromagneettisten aaltojen sähköisten ja magneettisten komponenttien vuorovaikutukseen (kuva 7). Kun nämä komponentit ovat samassa vaiheessa, sanotaan säteen olevan koherenttia. Avaruudellinen koherenssi tarkoittaa sitä, että aallot ovat samassa vaiheessa eri avaruuden pisteissä yhtenä ajan hetkenä. Ajallinen koherenssi puolestaan tarkoittaa samaa vaihetta yhdessä avaruuden pisteessä ajan kuluessa. Koherenssia voidaan verrata vaikkapa marssivaan osastoon. Jos katsotaan osaston riviä tietyllä hetkellä, osaston jäsenet ovat järjestyneet olka olkaa vasten. Tämä on avaruudellista koherenssia. Jos taas katsotaan osaston jonoa jonkin aikaa, jäsenet ovat sijoittuneet tasaisin välein. Tämä on ajallista koherenssia. Tavallista valoa voisi verrata vaikkapa torilla kulkevaan ihmisjoukkoon./8/



(a) Koherentti valo



(b) Epäkoherentti valo

Kuva 7. Koherentti ja epäkoherentti valo./8/

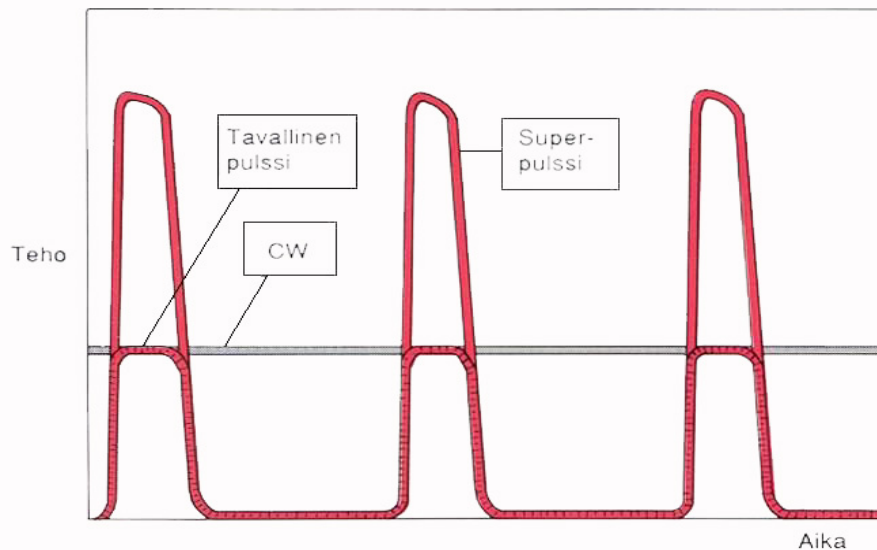
3.2.3 Kollimaatio

Diffraktio on ilmiö, jossa valo taipuu teräväkulmaisten kohteiden kohdalla. Kun tavallinen valo kulkee pitkän matkan, suuri osa siitä siroaa tai sen suunta muuttuu diffraktion vaikutuksesta. Sen seurauksena valon intensiteetti pienenee nopeasti valonlähteestä poispäin mentäessä. Yksi laservalon eduista tavalliseen valoon nähden on sen säteen erittäin vähäinen diffraktio. Vähäisen diffraktion omaavaa valoa sanotaan kollimoiduksi. Niinpä laservalo voi kulkea pitkän matkan ilman, että säteen suunta muuttuu tai että sen intensiteetti merkittävästi pienenee. Säteen leviämiskulma voi olla hyvälaatuiselle säteelle jopa alle 0,2 milliradiaania. Lasersäteen hyvä kollimaatio

tarkoittaa myös sen helppoa ja tarkkaa fokuoitavuutta. Näin saadaan pienelle alueelle aikaiseksi suuri energiatiheys./8/

3.2.4 Teho

Leikkauksessa käytetään eniten CO₂-lasereita, koska niillä on korkea tehon keskiarvo. Niitä voidaan käyttää sekä jatkuvaa sädettä (Continuous Wave, CW) tuottaen että pulssitettuna ja niiden tuottaman säteen tehojakauma on edullinen. Jatkovaa sädettä tuottavalla teollisella CO₂-laserilla voidaan saavuttaa 15 kW teho. Suurin pulssiteho voidaan saavuttaa tietyillä kidelasereilla. Näissä lasereissa laseroiva väliaine on kiinteä. Erittäin lyhyen pulssin hetkellinen teho voi olla jopa terawatteja./6,9/

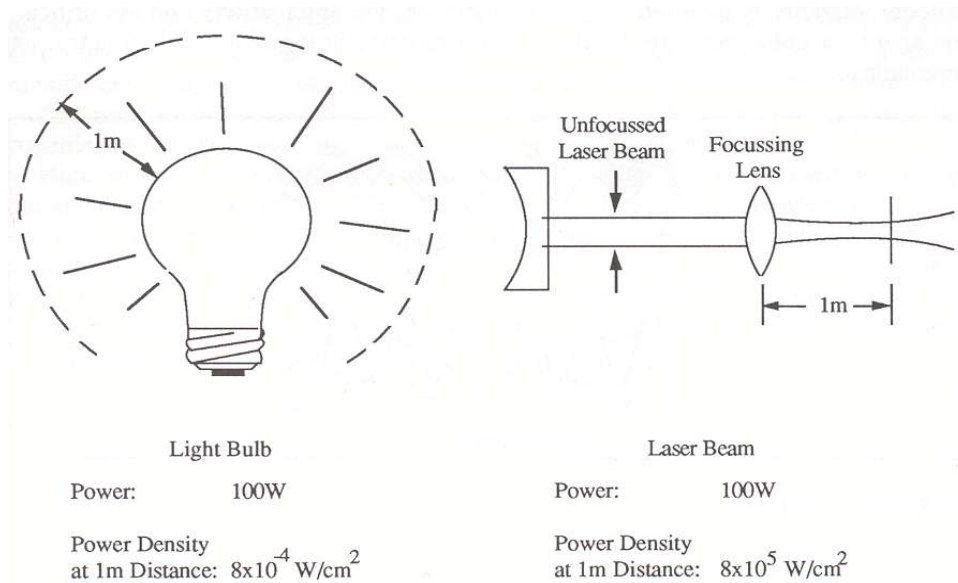


Kuva 8. Superpulssitus./9/

Yleensä CO₂-laserin pulssitus tapahtuu käyttämällä apuna elektronista virrankatkaisinta, joka kytkee virran vuoroin päälle ja pois, niin että pulssin pituutta voidaan vaihdella 0,1 millisekunnista jatkuvaan säteeseen. CO₂-lasereilla pulssin huipputeho on yleensä samaa luokkaa kuin jatkuvalla säteellä saavutettava suurin teho, mikä merkitsee, että pulssitus alentaa tehon keskiarvoa, eikä lisää tehotiheyttä hetkellisestikään. On kuitenkin CO₂-lasereita, joilla pulssien huipputeho voi olla jopa viisinkertainen verrattuna jatkuvan säteen tehoon. Tätä ominaisuutta kutsutaan superpulssittamiseksi tai pulssin vahvistamiseksi./9/

3.2.5 Tehotiheys

Valonlähteen tehotiheys on sen lähettämän valon teho pinta-alayksikköä kohti tietyllä etäisyydellä valonlähteestä. Lasersäteen ominaisuudet mahdollistavat säteen äärimmäisen tarkan fokuositavuuden. Sadan watin hehkulampun tehotiheys metrin päässä lampusta on noin $8 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$. Lasersäteen fokuoitu tehotiheys metrin etäisyydellä samalla sadan watin lähtöteholla voi olla jopa miljardikertainen (kuva 8).



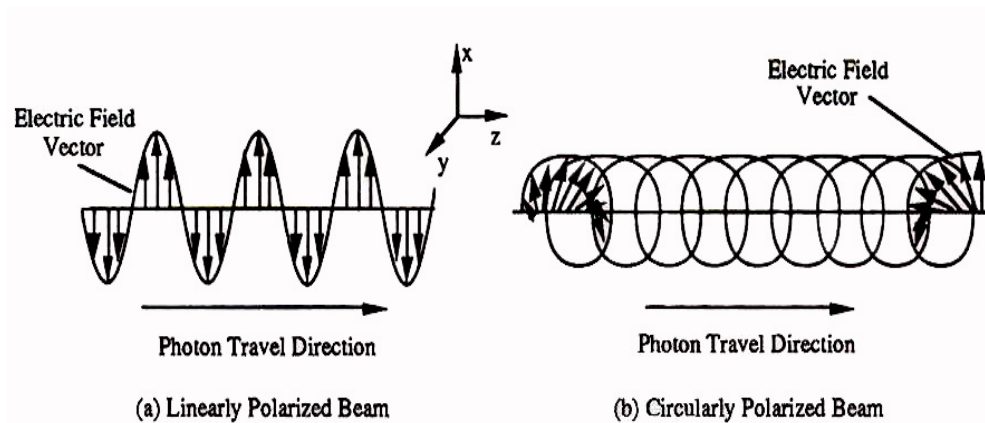
Kuva 9. Monokromaattisen ja polykromaattisen valon tehotiheys vertailua.

Suurimmat teollisilla jatkuvatehoisilla työstölaserereilla saavutettavat tehotiheydet ovat luokkaa 30 MW/mm^2 . Jos esimerkiksi auringon valoa fokuoitiin linssin avulla, saadaan polttopisteeseen noin 5 W/mm^2 tehotiheys. Kynttilän liekin tehotiheys on noin 1 W/mm^2 .

3.2.6 Polarisaatio

Kun fotonit kulkevat tilassa, sillä on oskilloiva liike, joka aiheuttaa sen sähkökentän ja magneettikentän oskilloinnin ja tuottaa siis sähkömagneettisen aallon. Tämä aalto kuvaa fotonin sähköisen kentän vektorin suuntaa ja suuruutta ajan funktiona. (kuva 10.) Epäkoherentin valon fotonit oskilloivat satunnaisesti suuntaan, eri taajuuksilla ja eri vaiheissa. Tämä tuottaa elektromagneettisia aaltoja, joilla on satunnainen suunta ja

vaihe. Laservalo on koherenttia ja monokromaattista, joten sen fotoneilla on sama suunta ja vaihe. Laservalon fotonien sähkökentät ovat siis järjestäytyneet samaan suuntaan. Tästä ominaisuudesta johtuu, että lasersäde on lineaarisesti polarisoitunutta. Lineaarisen polarisaation ehtona on vielä resonaattorin taittopeilit. Vanhemmissa lasereissa, ja jopa joissakin uudemmissa, polarisaation suunta saattaa olla satunnainen jos resonaattorissa ei ole taittopeilejä./5,8/



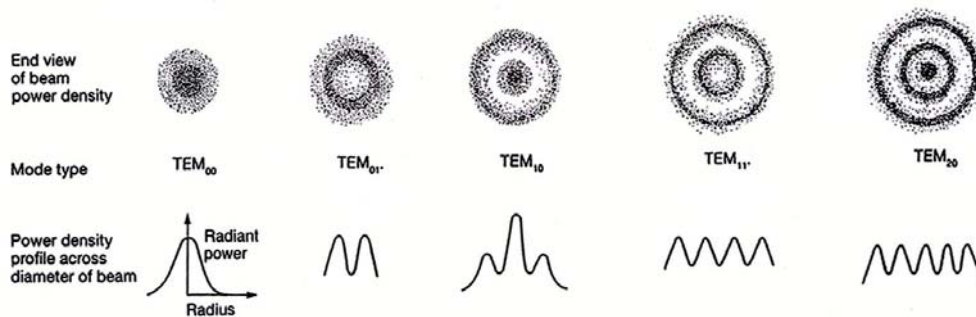
Kuva 10. Lineaari- ja ympyräpolarisoitu valo./8/

Polarisoituneella säteellä on vaikutusta tiettyihin lasertyöstösovelluksiin sen siroamis- ja heijastumisominaisuuksien takia. Lineaarisesti polarisoituneella säteellä työstettäessä työstösuunnalla on merkitystä työnjäljen ja nopeuden kannalta. Työstösuunnasta johtuvat vaikutukset voidaan kuitenkin välttää käyttämällä ympyräpolarisaattoria. Ympyräpolarisaattori on voi olla esim. peilijärjestelmä, jossa neljä peiliä on aseteltu 45 asteen kulmaan säteen kulkusuuntaan nähden. Peilit kääntävät säteen polarisaation suuntaa siten, että sähkökentän suunta muuttuu ajan funktiona. (kuva 10b) Koska fotonit kuitenkin pyörivät samaan suuntaan ja samassa vaiheessa, lasersäteen ominaisuudet säilyvät. Työstettäessä ympyräpolarisoidulla säteellä työstön suunnalla ei ole väliä./5,8/

3.2.7 Moodi

Laserresonaattori on optinen oskillaattori. Resonaattorin geometria määrää sen sisällä värähtelevän seisovan sähkömagneettisen aallon muodon. Interferenssin vaikutuksesta myös resonaattorista ulos tulevalle säteelle on tietty muoto. Säteen profiilia voidaan

kuvata sen TEM-moodilla eli intensiteettijakaumalla. TEM on lyhenne sanoista Transverse Electromagnetic Mode. TEM-moodi kirjoitetaan yleensä muotoon TEM_{nm} , missä n ja m tarkoittavat säteen akselia vastaan kohtisuoran profiilin geometrian solmukohtien lukumäärää (kuva 11). TEM_{00} -moodi on jakautunut gaussin-käyrän mukaisesti ja sitä pidetään yleisesti parhaana työstömoodina materiaalia poistettaessa, esim. leikkauksessa. TEM_{00} -moodin maksimitehotiheys on säteen keskellä ja se voidaan fokusoida pienimmäksi mahdolliseksi pisteeksi. Näin saadaan aikaan suurin mahdollinen tehotiheys./6,8,10/



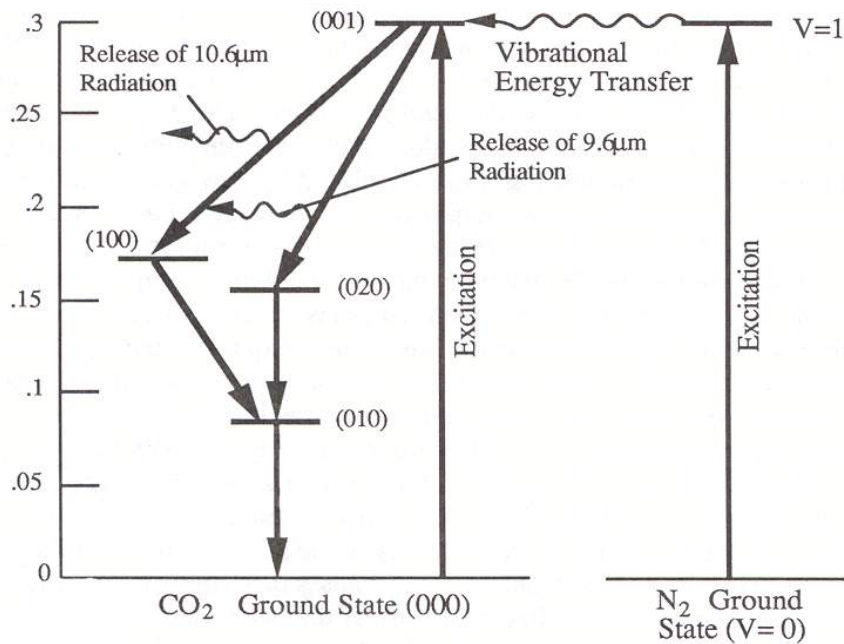
Kuva 11. Lasersäteen moodin poikkileikkaus./10/

3.3 Työstölasereiden päätyypit

3.3.1 CO₂-laser

Hiilidioksidilaser emittoi valoa elektromagneettisen spektrin infrapuna-alueella aallonpituudella 10,6 μm . Laseroivana väliaineena CO₂-laserissa on hiilidioksidi-, typpi- ja heliumkaasujen seos. Hiilidioksidi saadaan laseroinnin vaatimaan korkeamman energian tilaan lisäämällä hiilidioksidimolekyylin värähtelyenergiaa. Varsinainen pumppaus populaatioinversion saavuttamiseksi tehdään tasa- tai vaihtovirtasähköpurkauksella. Tosin vain pieni osa hiilidioksidista virittyy suoraan sähköpurkauksella. Suurin osa sähköenergiasta absorboituu typpikaasuun. Suurin osa hiilidioksidimolekyyleistä saa virityksensä törmäyksistä typpimolekyylin kanssa. Typpi siis siirtää ylimääräisen energiansa hiilidioksidille. Energian siirto on erittäin spesifinen ja tapahtuu siis vain typen ja hiilidioksidin välillä. Virittynyt hiilidioksidi törmää toiseen, vielä perustilassa olevaan, hiilidioksidimolekyyliin ja sen energia laskee jollekin alemmalle energiatasolle. Näistä tasoista yksi emittoi fotonin 10,6 μm

aallonpituudella. Loput viritysen energiasta häviää kineettisiin energian muutoksiin, jotka tuottavat lämpöä valon sijasta./8/



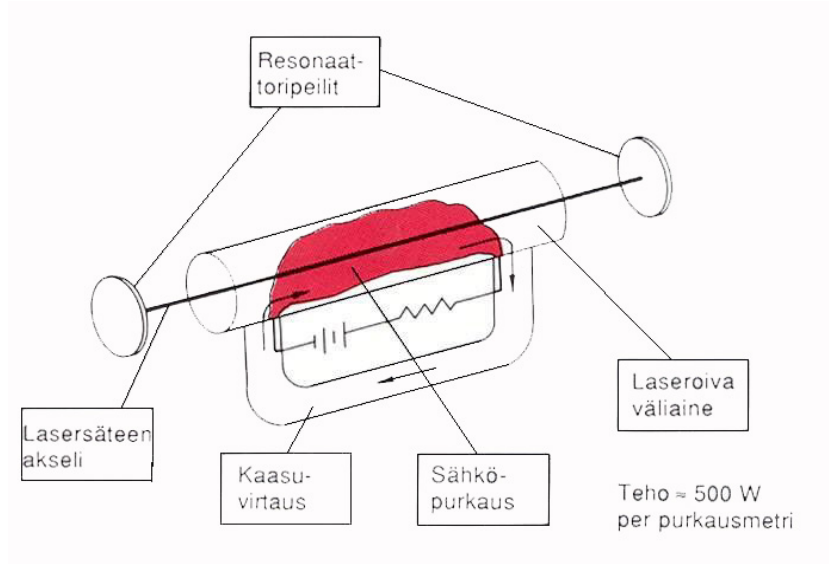
Kuva 12. Hiilidioksidin energiatasot./8/

Laserin hyötysuhde riippuu käytetystä laitteistosta ja siitä, onko laitteessa pyritty suureen tehoon vai hyvään säteen laatuun. Teoriassa laserlaitteen paras mahdollinen hyötysuhde on 21%./12/

Heliumin tehtäväksi kaasuseoksessa jää ylimääräisen lämmön siirtäminen pois resonattorista./8/

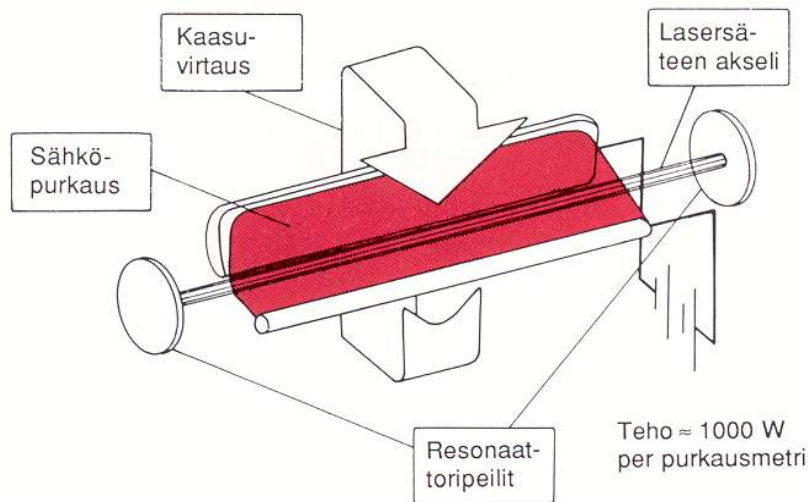
CO₂-laserien ominaisuudet määräytyvät lähinnä kaasun virtaustavan mukaan. Hiilidioksidilasereita on neljää päätyyppiä; suljettu, aksiaalivirtaus (nopea tai hidas)-, poikittaisvirtaus- ja diffuusiojäähdytettylaser. Suljetussa laserissa kaasu on suljetussa resonattorissa, niinpä se ei tarvitse erillistä kaasupulloa tai kaasun hallinta järjestelmää. Tämän järjestelmän teho on rajoittunut tällä hetkellä noin 700 wattiin, koska kaasu ei vaihdu resonattorissa. Myös laserin ikä on rajallinen likaantumisen ja hiilidioksidin hiljalleen tapahtuvan hajoamisen seurauksena. Nopean

aksiaalivirtauksenlaser on eniten käytetty CO₂-lasertyyppi. Siinä kaasu virtaa resonaattorin optisen akselin suuntaisesti ja uusiutuu samalla. Aksiaalivirtauslaserit jaetaan vielä hitaan aksiaalivirtauksen ja nopean aksiaalivirtauksen (kuva 12) järjestelmiin kaasun virtausnopeuden mukaan. Tämän tyyppisillä lasereilla päästään jopa 20 kW:n tehoihin, mutta yleensä teho teollisissa lasereissa on 2 – 12 kW./8,9/



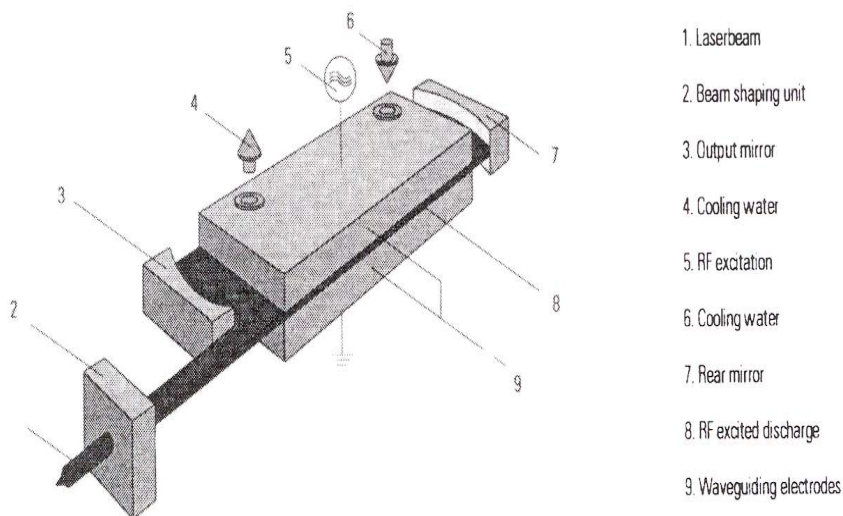
Kuva 13. Nopean aksiaalivirtauksen periaate./9/

Kolmannessa CO₂-lasertyyppissä kaasun kuljetus on toteutettu poikittaisvirtauksella (kuva 14). Siinä kaasu virtaa kohtisuoraan resonaattorin optiseen akseliin nähden. Poikittaisvirtausresonaattorissa säde heijastetaan peileillä siten, että se on ikään kuin laskoksilla resonaattorin sisällä. Tehoa tällä menetelmällä voidaan saada aikaan jopa 60 kW./8,9,13/



Kuva 14. Poikittaisvirtauslaserin periaate./9/

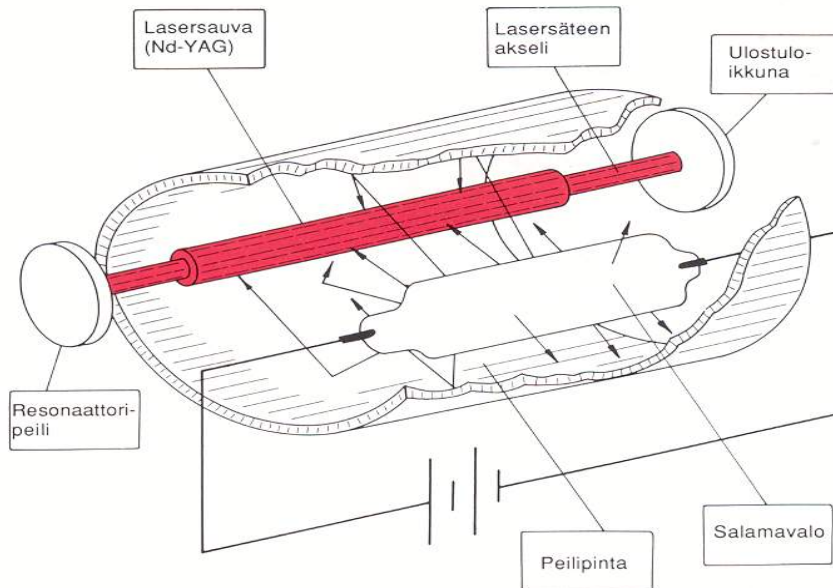
Diffuusiojähdytetyn laserin resonaattori on kahden vesijähdytetyn kuparielektrodin välisessä kapeassa raossa. Diffuusiojähdytetyn laserin kaasunkulutus on erittäin pieni. Tilaa vieviä kaasunkierrätysjärjestelmiä ei siis tarvita ja laser saadaan helposti kompaktin kokoiseksi. Säteen laatu on hyvä, joskin suorakaiteen muotoinen. Tämän tyyppiseen laseriin kuuluukin yleensä ulkoinen säteenmuokkauslaite./5,10,12/



Kuva 15. Diffuusiojähdytetty hiilidioksidilaser./12/

3.3.2 Nd:YAG laser

Nd:YAG laserit ovat kidelasereita. Nimilyhenne tulee sanoista neodyymi-yttrium-alumiini-granaatti. Laseroivana väliaineena on neodyymi, jota on seostettu yttrium-alumiini-granaattikidesauvaan./9/



Kuva 16. Nd:YAG laserin toimintaperiaate./9/

Nd:YAG-laserissa laseroivana väliaineena on kiinteä sauva, jossa salamalampun, kaarilampun tai diodilaserin tuottama valoenergia muutetaan laservaloksi. Valo heijastuu lampusta lasersauvaan näitä ympäröivästä elliptisestä peilistä. Muutaman prosentin verran valosta imeytyy sauvaan ja muuntuu laservaloksi, jonka aallonpituus on $1,06\mu\text{m}$. Pulssitetun lasersäteen tuottamiseen käytetään Nd:YAG:ssa salamalamppua ja jatkuvatoimisen säteen tuottamiseen kaarilamppua tai diodilaseria./9/

Tämän lasertyypin antoteho on enimmillään keskimäärin 4-6 kW. Alhainen hyötysuhde tuottaa ongelmia. Ottotehon on oltava varsin korkea ja suurin osa energiasta muuttuu sauvassa lämmöksi, mistä aiheutuu jäähditys ongelmia. Kuumentuessaan sauva taipuu ja toimii linssinä vaikuttaen säteen tehojakaumaan. Nd:YAG-lasereita käytetään myös pulssitettuna. Vaikka tehon keskiarvo on vain muutama sata wattia, saadaan pulssin

huipputehoksi helposti yli 5 kW. Nd:YAG lasereita käytetään mm. leikkaukseen, merkkaukseen, poraukseen ja hitsaukseen./9/

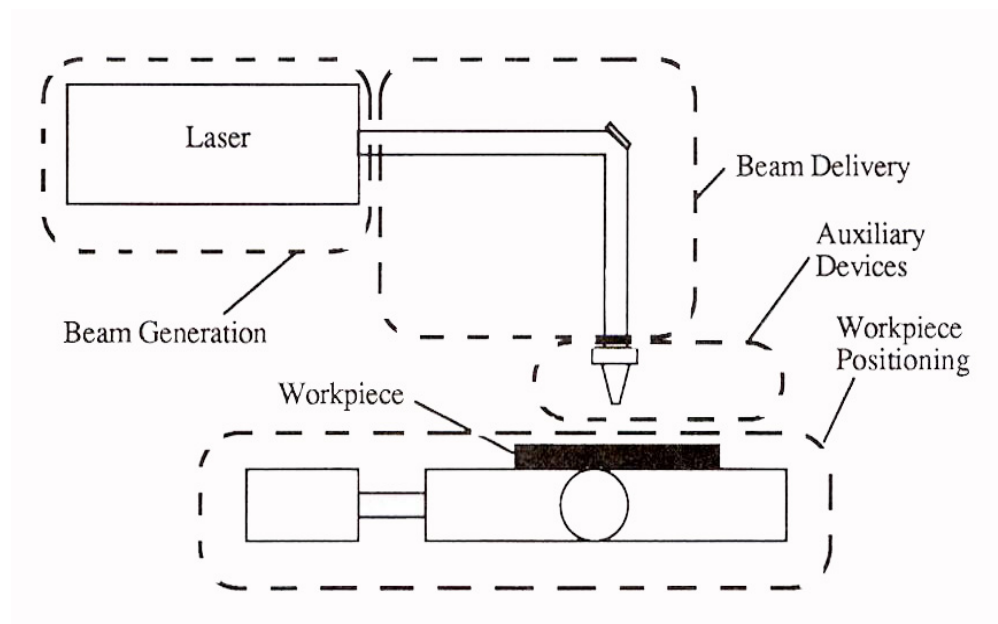
3.4 Lasertyöstölaitteisto

Jokaiseen lasertyöstöjärjestelmään kuuluu joukko optisia, sähköisiä ja mekaanisia komponentteja, jotka voidaan jaotella karkeasti neljään pääryhmään (kuva 16):

- Laser (resonaattori)
- Säteen kuljetus ja fokusointi
- Työasema
- Lisälaitteet

Nämä eri alueet yhdistävät samaan laitteistoon usean eri alan teknologiaa. Monet näistä teknologioista ovat syntyneet jo paljon ennen laserin keksimistä. Joissakin tapauksissa laserin vaatimukset ovat auttaneet myös vanhojen teknologioiden kehitystä ja menekkiä./8/

Säde syntyy resonattorissa kuten kappaleessa 3.1.3 on jo kerrottu, joten sitä ei käsitellä tässä uudestaan. Seuraavassa siis enemmän laseroptiikasta ja muista laitteista./8/



Kuva 17. Lasertyöstöjärjestelmän pääosat./8/

3.4.1 Säteen kuljetus ja fokusointi

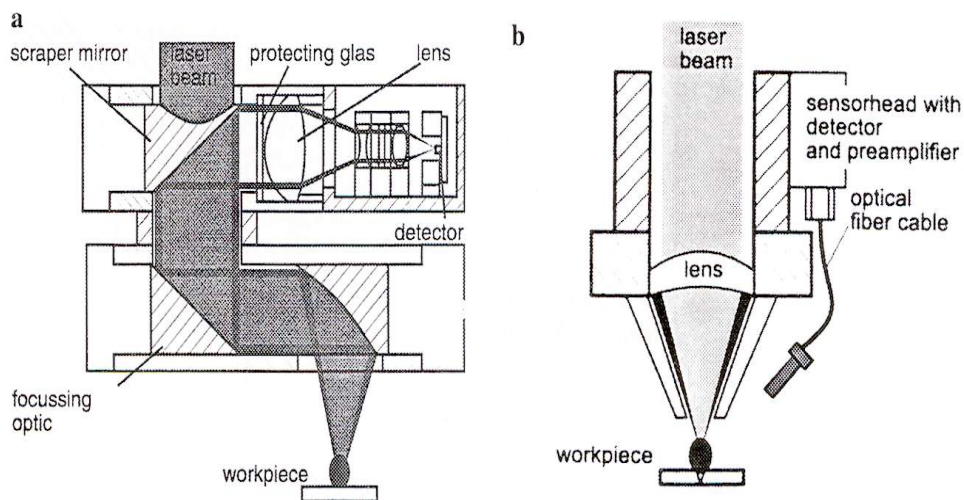
Säteenkuljetus järjestelmät koostuvat pääasiassa optisista komponenteista, joilla lasersäde fokusoidaan työkappaleen pintaan. Pääkomponentit säteenkuljetusjärjestelmissä ovat peilit, polarisaattorit, säteenjakajat, linssit ja optiset kuidut./8/

3.4.1.1 Peilit

Säteenkuljetusjärjestelmän peilit on yleensä tehty metallista. Metallit heijastavat hyvin, joten säteen energiahäviö jää pieneksi. Metalliset peilit kestävät myös hyvin korkeita energiatiheyksiä ilman lämpövaurioita, koska niiden lämmönjohtokyky on korkea. Yleisin peilimateriaali on kupari, joka kestää jopa 100 kW/cm^2 :n energiatiheyksiä ilman lämmöstä johtuvia vaurioita. Päälystämätön kupari on kuitenkin pehmeää, vaikea puhdistaa ja hapettuu helposti. Kuparipeilit onkin usein päällystetty dielektrisellä materiaalilla, joka suojaa kuparipintaa ja parantaa peilin optisia ominaisuuksia. Peilit ovat lisäksi vesijäähdytettyjä lämpövääritymien estämiseksi ja heijastumisen maksimoimiseksi./8/

3.4.1.2 Säteen fokusointi

Fokusointioptiikkaa käytetään lasersäteen keskittämiseen pieneen korkean energiatiheyden omaavaan pisteeseen. Fokusointi voi tapahtua peileillä tai linseillä.



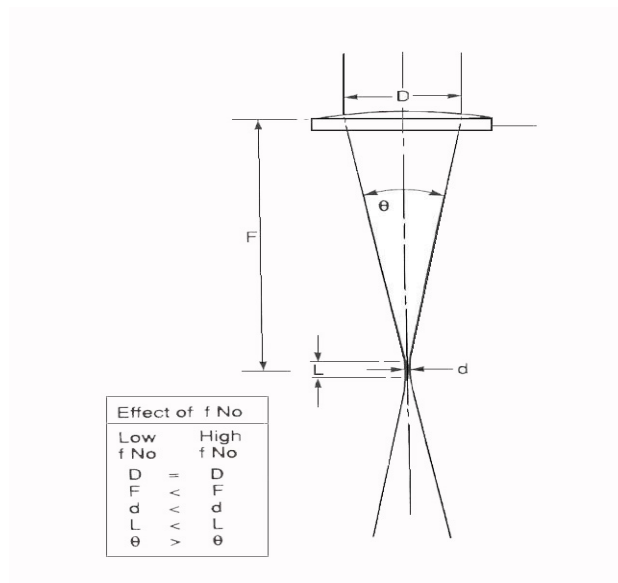
Kuva 18. Linssi- ja peilifokusoinnin periaate./13/

Hiilidioksidilasereissa fokusointiin käytetään yleensä linssiä. Linssien täytyy läpäistä hyvin lasersäteilyn aallonpituutta, siksi esim. CO₂-laserin linssimateriaaliksi ei käytä tavallinen lasi. Hiilidioksidilasereille yleisin linssimateriaali on sinkkiselenidi. Muita mahdollisia ovat natriumkloridi, kaliumkloridi galliumarsenidi ja germanium. Nd:YAG säteen fokusointiin käytetään yleisimmin kvartsilasilinssiä./8,12/

Fokusointilinssejä on viittä perustyyppiä, joiden nimet viittaavat linssin muotoon/14/:

- Asfeerinen
- meniskus
- parabolinen
- plano-konvekksi
- bi-konvekksi

Fokusoinnilla pienennetään lasersäteen koko raakasäteestä niin pieneksi, että lasersäteen intensiteetti kasvaa työstön edellyttämälle tasolle. Esimerkiksi keyhole-hitsaukseen tarvitaan 10⁶ W/mm² tehtiheys. Kuvassa 19 on koottu fokusoinnin muuttujat. Polttopisteen koolla on oleellinen rooli säteen hyödyntämisessä. Periaatteessa kaikki materiaalia poistavat prosessit sujuvat sitä paremmin, mitä pienempi polttopisteen halkaisija on. Polttopisteen koon minimiä rajoittavat säteen fokusoitavuus, optiikan virheettömyys ja säteen aallonpituus. Käytännössä nykyisellä optiikalla ja hiilidioksidilaserilla polttopisteen halkaisija on 0,1 – 1,0 mm./12/



Kuva 19. Lasersäteen fokuoinnin muuttujat. Polttopisteen halkaisijaan (d) vaikuttavat raakasäteen koko (D), polttoväli (F) sekä optiikan ja säteen laatu sekä moodi. Kuvassa f-luku on polttovälin ja raakasäteen suhde (F/D)./13/

Fokusointioptiikan merkitys on kaksijakoinen. Polttoväli on fokusointioptiikan ja polttopisteen välinen etäisyys. Polttovälin pidentäminen pidentää myös fokuipistettä lasersäteen suunnassa. Samalla fokuipisteen halkaisija kasvaa ja tehotiheys fokuksessa alenee./12/

Fokusoidun säteen halkaisija voidaan laskea kaavan 3 mukaan.

$$d_{\text{foc}} = \frac{4F\lambda}{D\pi K} \quad (3)$$

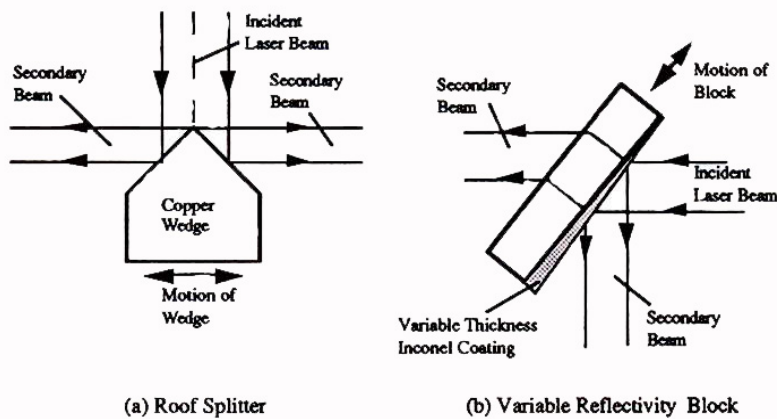
jossa D raakasäteen halkaisija
 d_{foc} fokusoidun säteen halkaisija
 F fokuioivan optiikan polttoväli (tämä merkitään yleensä f)
 K K-luku
 λ lasersäteen aallonpituus

K-luku kuvaa säteen laatua. Mitä lähempänä K-luku on arvoa 1, sitä lähempänä säde on ideaalisädettä, jolla on mahdollisimman hyvä fokusoitavuus./10/

3.4.1.3 Säteenjakajat

Säteenjakaja (beam splitter) on optinen laite, jonka tehtävänä on heijastaa osa siihen tulevasta säteilystä ja päästää osa lävitseen. Säteenjakajaa voidaan käyttää jakamaan yhdestä lähteestä tuleva säde useisiin eri työkohteisiin samassa työasemassa. Toisaalta säteenjakajalla voidaan vaimentaa työkappaleeseen kohdistuvan säteilyn tehoa johtamalla osa säteestä esim. tehokaivoon./8/

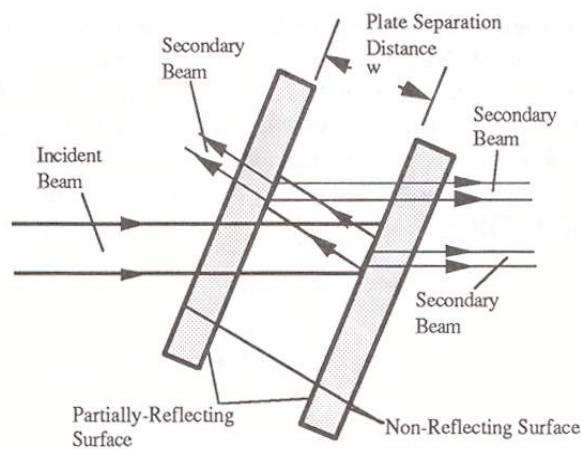
Säteen voi jakaa kolmella eri tavalla: heijastamalla, interferenssillä ja polarisaatiolla. Heijastusmenetelmässä voidaan käyttää esim. kiilaa, jonka kulma on käännetty tulevaan säteeseen päin.(kuva 20) Vaihtelemalla kiilan asemaa säteeseen nähden voidaan heijastuneiden säteiden tehosuhdetta muuttella. Vaihtoehtoinen menetelmä kiilalle on käyttää kappaletta, jonka pinnoitteen paksuus muuttuu kappaleen mitalla. Näin saadaan aikaan muuttuvat heijastusominaisuudet./8/



Kuva 20. Heijastukseen perustuvia säteenjakajia./8/

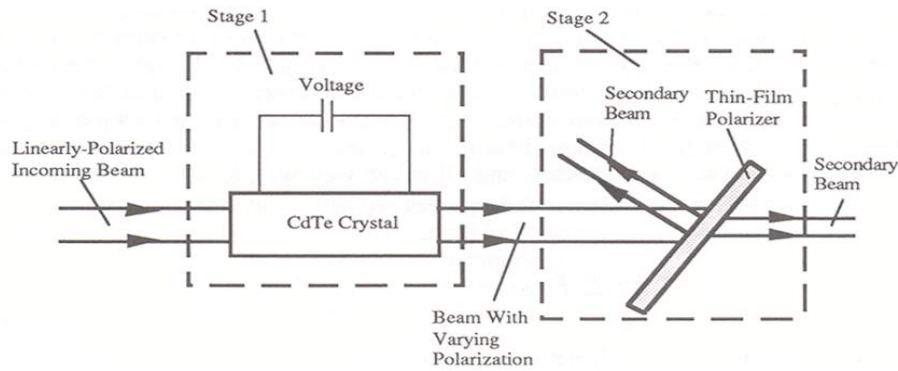
Yksinkertaisimmillaan heijastava säteenjakaja voi olla vaikkapa liikuteltava peili, jolla säde suunnataan ajallisesti eri kohteisiin. Heijastusmenetelmää käytetään myös pinnoitetussa ikkunassa, jonka pinnoitus määrää läpi menneen ja heijastuneen säteen suhteen./10/

Säteen jakaminen interferenssimenetelmällä perustuu Fabry-Perotin interferometriin, jossa on kaksi osittain läpäisevää yhdensuuntaista sinkkiselenidillä päällystettyä peiliä.(kuva 21) Peilien välissä on pieni rako. Riippuen säteenjakajaan tulevan säteen aallonpituudesta ja peilien välisen raon koosta, lähtevät heijastuneet ja läpimenneet fotoniaallot joko vahvistavat tai heikentävät toisiaan interferenssin vaikutuksesta. Levyjen välistä etäisyyttä voidaan muuttaa piezo-elektrisesti ja näin muuttaa heijastuneen ja läpi menneen säteen tehosuhdetta./8/



Kuva 21. Fabry-Perotin interferometri./8/

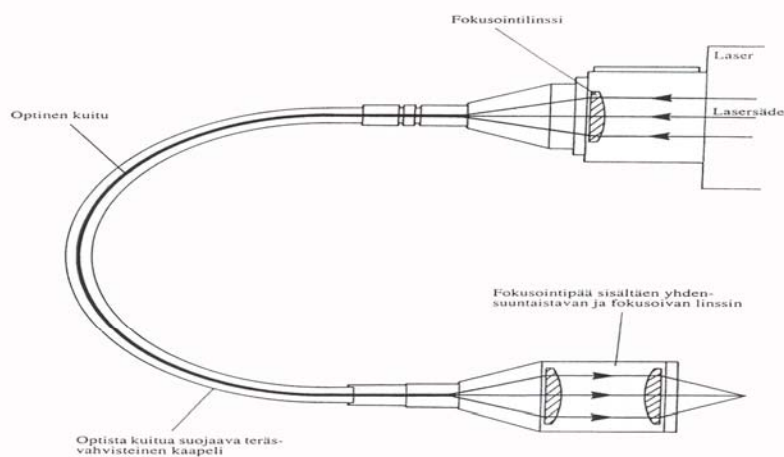
Säteenjakoaminen polarisaatiomenetelmällä (kuva 22) tapahtuu kaksiosaisessa prosessissa, jossa laitteeseen tuleva lineaarisesti polarisoitunut säde jaetaan kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa cadmium telluridi (CdTe) kiteen yli johdettu sähkövirta muuttaa säteen sähkökentän suuntaa. Suunnan muutoksen suuruus riippuu kiteeseen johdetun jännitteen suuruudesta. Toinen osa koostuu ohutfilmipolarisaattorista. Polarisaattori päästää lävitseen fotonit, joiden sähkökenttä on saman suuntainen sen polarisaatiotason kanssa. Kiteen jännitteen muuttuessa siihen osuvan säteen sähkökentän suunta vaihtelee polarisoivan tason kanssa samansuuntaisesta (p-polarisaatio) poikittaiseen (s-polarisaatio). Kun säde osuu polarisoivaan tasoon, kaikki p-polarisoituneet fotonit menevät tasosta läpi ja s-polarisoituneet heijastuvat./8/



Kuva 22. Polarisaatioon perustuva säteenjakaja./8/

3.4.1.4 Kuituoptiikka

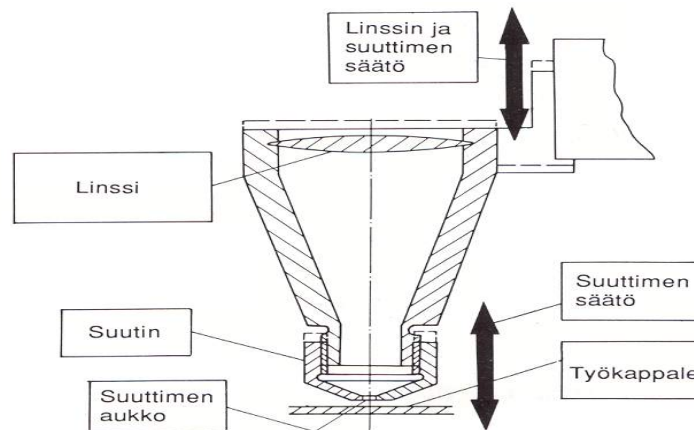
Eräs peileihin perustuvan säteenkuljetuksen ongelmista on se, että leikkauspään joustava liikuttelu vaatii monimutkaisen ja useita osia sisältävän peilijärjestelmän. Tämä monimutkaisuus vaikeuttaa laserin yhdistämistä useita liikesuuntia käsittäviin työstöjärjestelmiin, kuten robotteihin. Yksi vaihtoehto peileille on käyttää kuituoptista kaapelia laserin (vain Nd:YAG ja diodi) ja lasertyöstöpään välillä. Tehohäviöt kuidussa ovat lähes merkityksettömät, ellei kuitu ole taipunut voimakkaasti, koska kuidun sisällä tapahtuu kokonaisheijastus. Suurimmat tehohäviöt tapahtuvatkin kuidun päissä ja niihin liittyvissä linsijärjestelmissä. Tehohäviöt ovat useimmissa tapauksissa kuitenkin pienemmät kuin muutaman peilin järjestelmässä/8,10/



Kuva 23. Kuituoptinen säteenkuljetusjärjestelmä./10/

3.4.2 Leikkauspää

Tärkeänä osana laserlaitteistoa on leikkauspää, jossa on fokuointilinssi ja kaasusuutin. Ne muodostavat työkalun, jota laserlaitteen käyttäjä tarvitsee eri aineiden työstössä. Tämän työkalun tulee olla vakaa, helppo säätää ja yksinkertainen huoltaa./9/



Kuva 24. Leikkauspään rakennepiirite./9/

Kaasusuutin sijaitsee linssin alla ja siihen johdetaan säteen suuntaisesti kaasua, jonka tehtävänä on suojata linssiä työkappaleesta roiskuvalta materiaailta. Suojakaasun käyttö usein myös parantaa työstöjälkeä ja nopeuttaa leikkausta. Esimerkiksi metallien laserleikkauksessa kaasun tehtävänä on poistaa syntynyttä metallisulaa pois leikkausrailosta./8/

3.4.3 Leikkauskaasut

Kaasulasereiden resonaattorikaasun lisäksi laserleikkaujärjestelmät tarvitsevat ulkoisen leikkauskaasujärjestelmän. Leikkauskaasulla on useita eri tehtäviä:

- puhaltaa pois sula tai höyrystynyt materiaali leikkausrailosta
- suojata leikkausreunoja hapettumiselta, kun käytetään inerttiä kaasua
- tuoda termistä energiaa prosessiin, kun käytetään aktiivikaasua
- suojata leikkauslinssiä roiskeilta ja huuuilta
- jäähdyttää leikkauspintoja ja leikkaussuutinta

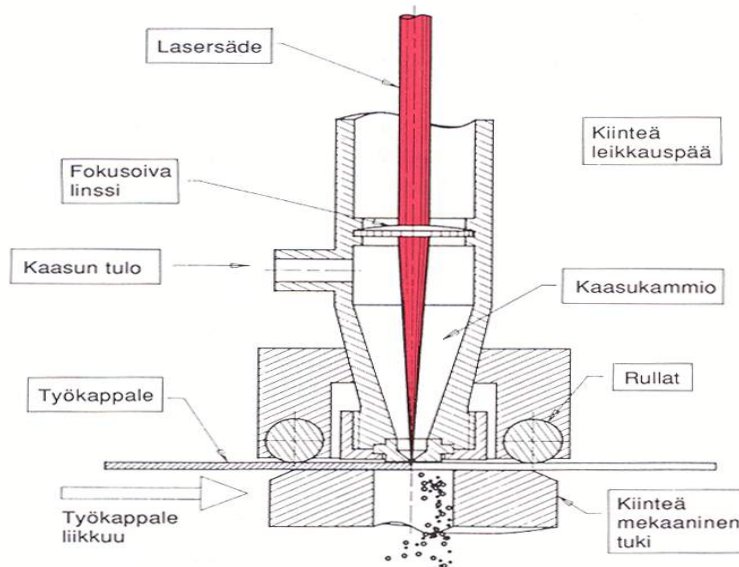
Laserleikkauksessa käytetään leikkauskaasuna tavallisesti happea, typpeä, argonia tai paineilmaa. Kaasun paineella on suuri merkitys laserleikkauksessa. Liian suuri

kaasunpaine tuo aktiivikaasuleikkauksessa liaksi energiaa ja leikkauspinta palaa liaksi. Liian pieni paine taas johtaa purseen muodostumiseen leikkauspinnan alapuolella, sillä kaasuvirtauksen liike-energia jää liian pieneksi puhaltaakseen sulan materiaalin pois leikkausrailosta./9,15/

3.4.4 Työkappaleen ja leikkauspään välinen liike

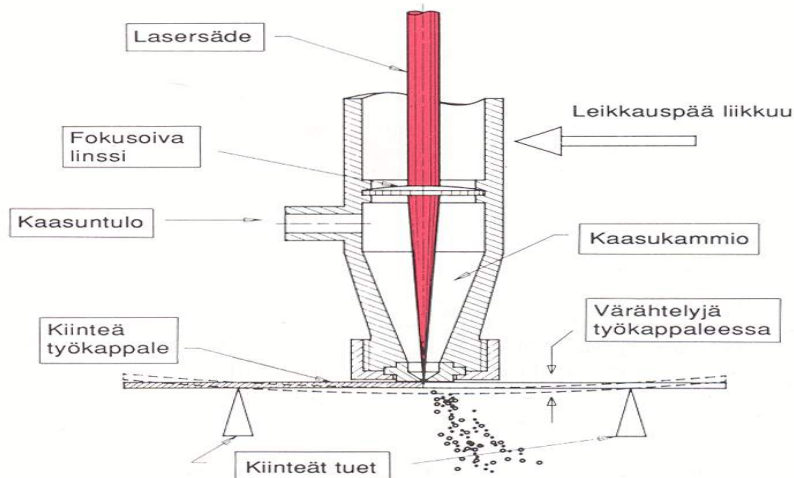
Lasersäteen ja työkappaleen välinen liike voidaan järjestää kolmella tavalla. Liikuttaen työkappaletta, liikuttaen leikkauspäätä ja näiden yhdistelmällä./8/

Työkappaletta voidaan liikuttaa xy-suunnissa säteen pysyessä paikallaan. Tällainen työkappaleen asettelu mahdollistaa suuren työstötarkkuuden ja skannausnopeuden. Suuria kappaleita työstettäessä tarvitaan toisaalta paljon lattiatilaa. Työstöpöydän pinta-alan tulee olla vähintään neljä kertaa työkappaletta suurempi. Kun työkappaletta liikutellaan säteeseen nähden, saattaa kappaleen geometrian monimutkaisuus rajoittaa sen asettelua. Työkappaleen paino rajoittaa myös sen liikuttelua. Joskin raskaita paksuja materiaaleja työstettäessä ei voida saavuttaa kovin suuria nopeuksia, joten työkappaleen kiihtyvyys ei siten välttämättä ole ongelma./8,9,15/



Kuva 25. Liikuvaa työkappaletta käyttävän laitteiston leikkauspään rakenne./9/

Kun leikkauspäätä liikutellaan työkappaleeseen nähden, saadaan tehtyä tarkkoja yksityiskohtia ja monimutkaisia muotoja. Leikkauspään paino on kuitenkin liikejärjestelmän nopeutta rajoittava tekijä. Leikkauspäätä liikuteltaessa sen etäisyys resonaattoriin vaihtelee. Vaikka lasersäde onkin lähes hajaantumaton, saattavat sen halkaisija, aaltorintaman muoto ja moodi muuttua etäisyyden muuttuessa. Tämä merkitsee sitä, että fokuosointiominaisuudet saattavat muuttua leikkauspään ja resonaattorin välisen etäisyyden vaihdeltaessa. Leikkauspäätä liikutettaessa on etuna laitteiston pienempi tilantarve./8,9/



Kuva 26. Liikuvaa optiikkaa käyttävän leikkauspään rakenne./9/

Monimutkaisten kuviodien työstämiseksi voidaan käyttää myös leikkauspään ja työkappaleen liikkeiden yhdistelmään./8/

4 PAPERIN JA KARTONGIN LASERLEIKKAUS

Tähän päivään mennessä laserilla on leikattu enimmäkseen metalleja. Paperin ja kartongin laserleikkaussovellukset ovat rajoittuneet muutamiiin erityiskohteisiin. Näitä ovat mm. savukepaperin rei'itys, pakkausten taittouran nuuttaus, monimutkaisten postikorttikuviodien leikkaus, sekä joitakin kokeiluja paperin pituus- ja arkkileikkauksesta. Lisäksi kartongin leikkaukseen tarvittavia stanssimuotteja on uritettu laserilla jo pitkään. Viimeaikoina on herännyt ajatus jättää leikkausstanssin

valmistus laserilla pois ja leikata suoraan kartonkia tai paperia laserilla. Yhtenä syynä tähän on digitaalisen painatuksen voimakas yleistyminen. /16,17,18,19,20/

Esimerkki laserleikkauksen mahdollisuuksista kuvassa 27.



Kuva 27. Taitettava laserleikattu postikortti./21/

4.1 Tekniset ja taloudelliset perusteet laserleikkaukselle

Teknisesti paperin ja kartongin laserleikkaus on täysin mahdollista ja leikkausjälki on usein yliverstaista perinteisiin menetelmiin verrattuna. Laserlaitteiston hankintaa ja käyttöä on kuitenkin pidetty verraten kalliina. Viimevuosina halventuneet laserlaitteistojen hinnat ja perinteisiin leikkausmenetelmiin verrattuna paremmasta leikkausjäljestä saavutettava lopputuotteen arvonlisä ovat tehneet laserleikkausmenetelmät kiinnostaviksi. Suurin laserleikkauksen etu on kuitenkin sen joustavuus. Eräkoko voi olla vaikkapa vain yksi kappale ja mitä tahansa siitä ylöspäin./22,23/

4.1.1 Perinteisten leikkausmenetelmien ongelmat

Leikattaessa paperia ja kartonkia tavallisilla teräksisillä pituus- ja poikkileikkausterillä esiintyy usein erilaisia ongelmia, jotka huonontavat tai pilaavat leikkuujäljen.

Leikkuukoneiden ja –terien valmistajat ovat uhranneet paljon aikaa näiden pulmien ratkomiseen, mutta kehityksestä huolimatta on ihanteellinen leikkuujälki vielä saavuttamatta. Erityisesti häiritsevät paperin- ja kartonginjatkojalostajia leikkuujäljen usein rosainen pinta sekä leikkuuterien irti repimät kuidunpätkät ja pigmenttihiukkaset. Painokoneilla tämä ns. paperipöly aiheuttaa ajettavuusongelmia. Samaan syy-seurausketjuun kuuluu myös painokoneiden tiheä pesun tarve. Laserilla leikattaessa voidaan saavuttaa erinomainen leikkausjälki ja syntyvän paperipölyn määrä on huomattavasti pienempi./24,25/

Teräleikkureiden terät kuluvat käytössä ja leikkausjälki huononee samalla ajan mittaan. Niinpä teriä täytyy teroittaa tai vaihtaa aika ajoin ja terien vaihdossa kuluu paljon aikaa. Lasersäde ei kulu, joten sen leikkausjälki pysyy aina samanlaisena. Leikattavan kuvion vaihtuessa stanssileikkurin teräkuvio on vaihdettava ja tämä saattaa kestää jopa useita päiviä. Laserilla leikattaessa ei tarvitse muuta kuin vaihtaa ohjelmaa. Parhaimmillaan aikaa menee vain pari sekuntia./26/

Laserilla leikattaessa leikkuujälki on erittäin siisti. Irtonaisia kuituja ei ole ja reuna jopa sulkeutuu jossakin määrin. Laser ei huononna paperin ominaisuuksia ja leikattu reuna on täysin kierrätettävissä./22/

4.1.2 Digitaalinen painatus ja laserleikkaus

Digitaalinen painatus ja laserleikkaus sopivat mm. Boylen /20/ mielestä hyvin yhteen ennen kaikkea siksi, että molemmat ovat kannattavia paljolti samoilla alueilla ja samoista syistä. Digitaalinen painatus on ollut olemassa nykyisessä muodossaan vasta kymmenen vuotta ja sen kasvu on tällä hetkellä kymmeniä prosentteja vuodessa./27,28/

Hülsbusch /29/ päätyy vuoden 1991 artikkelissaan tulokseen, ettei paperin tai kartongin tuotantomittakaavainen leikkaaminen laserilla ole taloudellisesti kannattavaa. Hän mainitsee kuitenkin poikkeuksena epäsäännöllisten ja monimutkaisten kuvioiden leikkaamisen pieninä tuotantoerinä. Tällaisia kohteita ovat mm. postikortit, palapelit, suodatinpapereiden leikkaus ja perforointi sekä pakkausten repäisyurien valmistus./29/

Boylen /20/ artikkelissa puhutaan digitaalisesta laserjalostuksesta (Digital Laser Converting), eli käytännössä paperin ja kartongin laserleikkauksesta. Digitaalisen leikkauksen vahvuudet ovat erityisesti alueilla, missä materiaali on vaikea tai jopa mahdoton leikata stanssilla tai erät ovat pieniä ja vaihtuvat usein. Toki laserleikkauksessa on muitakin hyviä puolia, mutta vastapainoksi tekniikan hinta on usein varsin kallista./20/

Digitaalisen leikkauksen suurin etu on ilmeinen; sen ansiosta pienten tuotantoerien valmistaminen on tehokasta. Etu muodostuu pääasiassa säästöistä, jotka saadaan, kun stanssimuotin valmistus jää pois. Muitakin pienempiä etuja voidaan saavuttaa. Yksi näistä on digitaalisen leikkauksen tarkkuus. Koska leikkaus on tietokoneohjattua, saadaan materiaali käytettyä mahdollisimman tarkkaan. Varsinkin jo valmiiksi painettuja aihioita leikattaessa jokainen pieleen mennyt leikkaus on kallis. Digitaalinen leikkaus on myös mahdollista automatisoida pitkälle, joten säästöjä saavutetaan henkilöstökuluissa. Etuna voidaan pitää myös kätevyyttä. Leikkauksen kuviota ja kokoa voidaan muuttaa parilla hiirennapin painalluksella./20/

Kuka sitten hyötyy digitaalisesta leikkauksesta? Boyle summaa digitaalisen laserleikkauksen edut seuraaviin kohtiin;

- laserleikkausta kannattaa käyttää kohteisiin, missä vielä leikataan käsin
- missä tahansa tuotantoerät ovat vielä pieniä tai ovat pysyväluonteisesti alle tuhannen kappaleen eriä
- aina digitaalisen painamisen yhteydessä
- kun vaaditaan tarkkaa kuvion geometriaa
- näyte-erien valmistuksessa
- kun materiaali on kallista ja sen saanto oltava suuri
- kun vaaditaan joustavaa tuotantoa ja nopeaa toimitusta
- mittatilaustöissä./20/

Polischuk /30/ luettelee samanlaisia etuja digitaaliselle painamiselle;

- pienten erien painaminen on taloudellista ja edullista pakkauksen ostajalle.

- erilaisia määriä prototyyppejä on kannattavaa tehdä digitaalisella painatuksella markkinatutkimuksia varten.
- pakkauksen merkkaus voidaan sisällyttää digitaaliseen painamiseen
- joustavuus johtaa tarvittavien varastojen pienenemiseen ja pakkauksen ulkonäön muuttuessa hukkaa ei tule niin paljon./30/

Digitaalinen leikkaus on siis luonnollinen osa digitaalista painoa. Digitaalisen painokoneen tuotantotehokkuus lisääntyy suuresti pieniä tuotantoeriä painettaessa. Samaan raaka-ainerullaan voidaan tehdä montaa eri erää, koska leikattavaa kuviota voidaan vaihtaa käytännössä lennosta. Samalla materiaalin käyttö tehostuu ja painamisen tuotantokustannukset alenevat./20/

4.1.3 Laserleikkauksen hinta

Arvioitaessa laserleikkauksen taloudellisuutta on otettava huomioon sekä investointi-, että käyttökustannukset. Laitteistolle ovat tunnusomaisia korkeat investointikustannukset ja keskitasoiset käyttökustannukset./9/

Laitteiston hinnoissa on eroja riippuen laserin koosta, tyypistä, leikkausakseliin lukumäärästä sekä leikkauspöydän koosta./9/

Käyttökustannukset muodostuvat sähköstä, leikkauskaasuista, laserkaasuista, sekä erilaisista kuluvista osista kuten salamalampuista ja optisista osista lasertyypistä riippuen./9,23/

4.2 Kuitumateriaalin leikkauksessa käytettävät laserit

4.2.1 CO₂-laser

Hiilidioksidilaser soveltuu hyvin kuitumateriaalin leikkaamiseen, sillä sen aallonpituus 10,6 µm absorboituu tehokkaasti (n. 90 %) kuituun. Absorboitunut energia höyrystää kaiken kuitumateriaalin./24/

Paperin ja kartongin leikkaamiseen pätee samat yleissäännöt kuin muidenkin materiaalien laserleikkauksessa. Säteen energiatiheuden on oltava korkea, koska energian on välityttävä mahdollisimman tehokkaasti leikattavaan materiaaliin ja energian muuttuminen lämmöksi on tapahduttava nopeasti. Leikkauksessa ja perforoinnissa korkea energiatiheys on tärkein tekijä. Tällöin saadaan aikaan nopea lämpötilan nousu ja suuri lämpötilagradientti./31/

4.2.2 Ti:safiirilaser

Leikattaessa paksuja selluloosapohjaisia materiaaleja (kartonkia, pahvia, puuta, jne.) hiilidioksidilaserilla, saattaa leikkausjälki hiiltyä leikkauksen termisestä luonteesta johtuen. Nader, Legacey ja Chin /32/ ehdottavat ongelman ratkaisuksi titaanisafiirilaseria. Ti:safiirilaser on ns. solid state laser, jonka laseroiva väliaine on kiinteä titaanisafiiri sauva. Laserin pumppaamiseen käytetään toista laseria, yleensä Nd:YAGia. Ti:safiirilaser kehittää erittäin lyhyitä (n. femtosekunnin luokkaa) matalaenergisiä pulsseja. Riittävä työstönopeus saavutetaan pulssien nopealla toistolla./32,33,34/

Nopeat lyhytkestoiset pulssit ionisoivat materiaalin pinnan makromolekyylit eli niistä irtoaa useita elektroneja. Laserin fokuksen alueella olevien molekyylien varaus jää vahvasti positiiviseksi. Coulombin repulsiivoimien kehittyminen makromolekyylien eri osien välillä johtaa räjähdykseen materiaalissa. Eli käytännössä fokuksen alueelta poistuu nopeasti materiaalia hienojakoisena pölynä. Tapahtuma on niin nopea ettei fokuksen ympäristö ehdi lämmetä lainkaan./32/

Selluloosapohjaista materiaalia työstettäessä Ti:safiirilaserilla leikkausjälki on erittäin siisti ja jäljelle jääneet kuidut täysin ehjiä. Materiaalista irtoava pöly on pääsääntöisesti pallon muotoista ja kooltaan 1-3 μm ./32, 34/

Ti:safiirilaserin käyttöä rajoittaa sen rakenteen monimutkaisuus ja kalleus. Laseroivan materiaalin virittyneentilan kesto on erittäin lyhyt. Niinpä Ti:safiirilaser on pumpattava toisella laserilla. Ti:safiirilaser on tarkoitettu lähinnä suhteellisen hitaaseen mikrotyöstöön eikä siten välttämättä sovellu leikkaukseen nopeutensa puolesta.

Myöskään laserin keskimääräinen teho ei kohoa kovin korkeaksi pulssituksen nopeudesta huolimatta./33/

4.2.3 Nd:YAG ja Excimer

Federle ja Keller /35/ testasivat paperin laserleikkausta 1992. Hiilidioksidilaserin lisäksi he kokeilivat leikkausta excimer ja Nd:YAG lasereilla./35/

Heillä ei ollut käytettävissä CW-toimista excimerlaseria ja pulssitaajuuden säätömahdollisuus ei ollut riittävä. Excimerillä saavutetut leikkausnopeudet olivat aivan liian alhaisia ollakseen käytännöllisiä./35/

Nd:YAG:n säteily puolestaan ei absorboitunut kunnolla paperin pintaan. Paperin pintaan saatiin aikaiseksi vain heikko naarmu, vaikka pulssin maksimiteho oli 5 kW ja fokuspisteen halkaisija vain 80 μm . Materiaalin läpi mennyt leikkaus saatiin aikaan täydellä teholla ja pienimmällä leikkausnopeudella, mutta leikkausjälki oli voimakkaasti hiiltynyt./35/

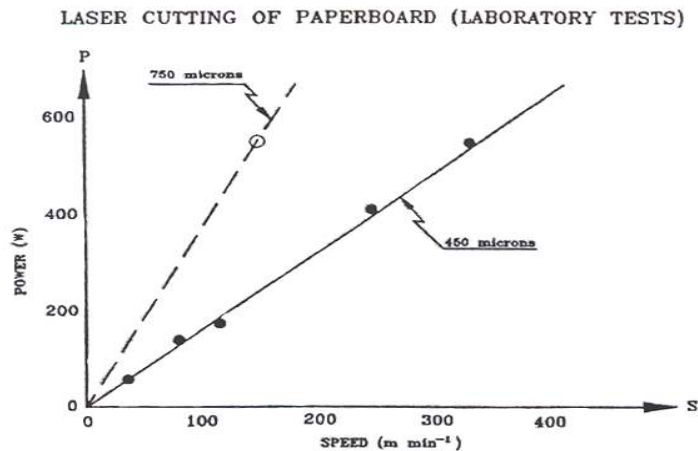
4.3 Paperin ja kartongin laserleikkauksen sovellukset

Digitaalisen painamisen ja laserleikkauksen yhdistämisen etuja on kuvailtu kappaleessa 4.1.2. Seuraavissa kappaleissa on kuvailtu muita paperin ja kartongin laserleikkaussovelluksia.

4.3.1 Pituusleikkaus

Ramsay ja Richardson /25/ kokeilivat päällystetyn kartongin pituusleikkausta 90-luvun alkupuolella Iggesundin kartonkitehtaalla. Päämotiivina kokeilulle oli mekaanisen leikkauksen pölyongelmien ratkaiseminen. Pölytön paperi vähentäisi pesun tarvetta painokoneella. He totesivat, että paperipölyhiukkasten keskimääräinen koko oli paljon pienempi ja hiukkasten kokonaismäärä oli puolet siitä mitä teräleikkuri tuottaa vastaavalla nopeudella leikattaessa. Pölynkeräys on kuitenkin järjestettävä eritoten täyteainetta varten./25/

Esikokeita varten Laser Ecosse toimitti 550 W MF600P CO₂-laserin. 48 mm polttovälillä laser tuotti 6,8 MW/cm² tehoitiheyden. Leikkauskaasuna käytettiin paineilmaa. Esikokeissa saatiin kuvan 27 mukainen yhteys leikkausnopeuden ja lasertehon välille. Leikatun kartongin reuna oli sulkeutunut ja hieman kellertynyt./25/



Kuva 28. Lasertehon vaikutus leikkausnopeuteen. Näyte leikattu CO₂-laserilla käyttäen pyörivää alustaa. Leikkauskaasuna oli käytetty paineilmaa./25/

Workingtonin tehtaalle asennettiin kaksi MF600P CO₂-laseria. Laserit suunnattiin kohtisuoraan kartonkiradan yläpuolelle ja fokus asetettiin yhden kolmanneksen verran kartongin sisään sen pinnasta lukien. Ulommainen laser asetettiin leikkaamaan 10cm reunanauhaa ja sisempi oli liikuteltavissa. Loput radan pituusleikkauksesta hoitivat tavalliset teräleikkurit. Kartonkiradan alapuolelle oli asennettu savukaasujen poistolaite./25/

Pituusleikkurin maksiminopeus oli 140 m/min, mikä oli vähemmän kuin mitä 450 µm paksua kartonkia olisi voinut leikata 550 W laserilla. Sataneljäkymmentä metriä minuutissa oli kuitenkin liikaa 700 µm ja sitä paksummille kartongeille. Maksiminopeus 700 µm paksulle kartongille oli 100 m/min. Laboratoriotuloksiin verrattuna noin 40 % nopeuden pudotus oli tarpeen. Koska teräpituusleikkurin normaali käyttönopeus oli 100 m/min, riitti MF600P teho hyvin alle 700 µm paksujen kartonkien leikkaamiseen. Lisäksi leikkauks jälki oli visuaalisesti täydellinen. Irtonaisia kuituja ei

ollut, reunat eivät kellastuneet ja leikkausjälki oli suoraa. Yli 700 µm paksuja kartonkeja piti leikata hieman alemmalla 85 m/min nopeudella./25/

4.3.2 Perforointi

Perforoinnilla tarkoitetaan paperin tai kartongin rei'ittämistä esim. katkaisulinjan tekemiseksi tai paperin ilmanläpäisevyyden lisäämiseksi.

Federle ja Keller/36/ tutkivat paperin rei'itystä laserilla ja huomasivat suurimmaksi eduksi perinteisiin menetelmiin verrattuna sen, että laserilla rei'iat voivat olla minkä kokoisia ja muotoisin tahansa. Laserrei'ityksen etuna oli myös se, että kuidut säilyivät ehjinä paikallaan joten paperin lujuusominaisuudet olivat paremmat kuin perinteisillä menetelmillä rei'itettäessä. Lisäksi mekaanisesti rei'itettäessä laitteiston kulumisen aiheutti vaihtelua reikien laadussa. Laserilla tätä ongelmaa ei ole vaan rei'iat ovat aina samanlaisia./36/

Rofin-Sinarilla /37/ on myynnissä valmis järjestelmä, jolla voidaan tehdä savukepaperiin jopa 500 000 reikää sekunnissa. Rullausnopeus voi olla 50-600 m/min. Savukepaperin rei'ityksellä vähennetään hengitettävän savun tervan ja nikotiinin määrää./37/

4.3.3 Aukaisu-uran valmistus

Perinteisillä mekaanisilla menetelmillä tehty pakkauksen aukaisu-ura saattaa joskus olla hankalasti avattava (kuva 29). Ura on joko liian kestävä tai repäisy lähtee etenemään väärään suuntaan. Lasersäde tuottaa aina vakiolaatuista uraa toisin kuin mekaaniset terät. Yhtenäinen uran syvyys ja muoto takaavat laserilla tehdyn repäisyuran lujuuden ja laadun toistettavuuden ilman että materiaalin lujuus- ja pakkausominaisuudet kärsivät. Nykyiset laserleikkausjärjestelmät ovat niin tarkasti säädettävissä, että materiaalia ei mene hukkaan vaikka leikkausnopeudet ja jopa itse materiaali vaihtuvat. Lisäksi aikaa säästää kun teriä ei tarvitse vaihtaa. Riittää kun muuttaa leikkausohjelmaa./17/

Directional tear is an integral part of the

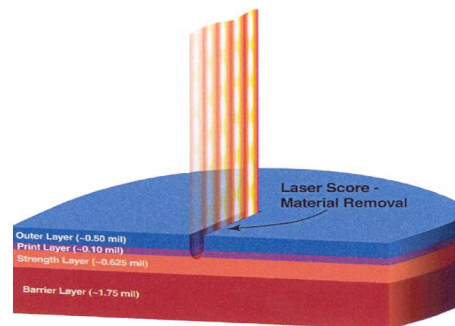
Closures - Opening - Reclosable solutions



Kuva 29. Laserleikkaus ratkaisuna repäisyn huonoon laatuun./17/

Lasersäteellä voi urittaa materiaalia helposti mihin suuntaan tahansa. Näin saadaan aikaan monimutkaisiakin muotoja suurella nopeudella. Kuvion muotoa on helppo muuttaa laseria kontrolloivaa ohjelmaa muuttamalla. Lasertehon säätelyn tarkkuuden parantuessa, repäisyuran laadun tasaisuuden lisäksi pakkauksen suunnittelija voi nyt myös määrätä pakkauksen avaamiseen tarvittavan voiman (kuva 30). Jos halutaan helppoa repäisyä, lisätään vain hieman lasertehoa ja päinvastoin vahvempaa uraa varten./17/

Precise Scoring Depth - Controllable Tear

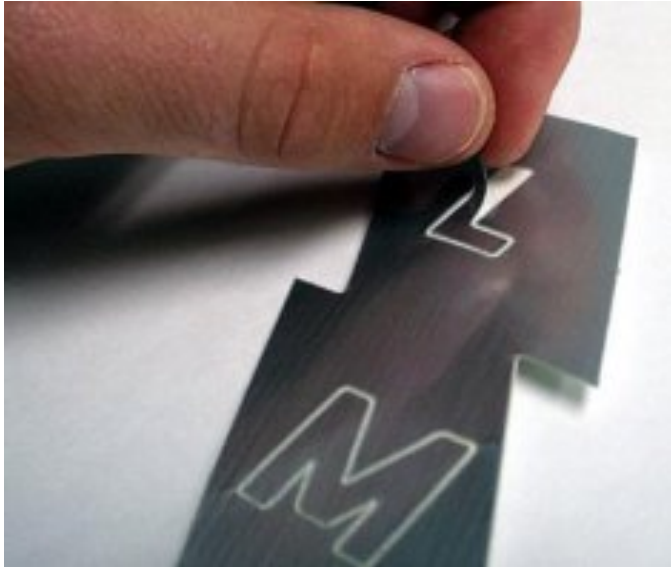


1 mil = 25 microns

Kuva 30. Laserleikattu repäisyura voidaan tehdä tarkasti haluttuun syvyyteen./17/

4.3.4 Laser kiss cutting

Laser kiss cutting on prosessi, jossa materiaalia leikataan ilman että siinä kiinni oleva toinen materiaali vaurioituu. Tarrapaperin leikkaus on hyvä esimerkki laser kiss cuttingista. Tarran muoto voidaan leikata ilman että leikataan taustapaperia (kuva 31)./38/



Kuva 31. Tarrapaperin laser kiss cutting./38/

Preco Laser Systems /38/ kirjaa seuraavia etuja laser kiss cuttingille;

- Toisin kuin mekaanisilla leikkureilla, lasersädettä voi liikuttaa täysin mielivaltaiseen suuntaan
- Laserprosessi ei kohdistu kappaleeseen minkäänlaisia voimia, joten hyvin hauraitakin kappaleita on helppo työstää ilman erityistä tukea. Teknologia soveltuu parhaiten suurta tarkkuutta vaativien kappaleiden työstöön. Myös materiaalin alkuperäinen muoto säilyy alusta loppuun
- Lasersäde pystyy leikkaamaan myös kovia ja kuluttavia materiaaleja leikkausjäljen siitä kärsimättä
- Teriin liimautuvat tarramateriaalit eivät ole ongelma
- Laserilla voi leikata hyvin suurilla nopeuksilla. Vain saatavilla oleva laserteho rajoittaa leikkausnopeutta

- Lasertyöstö on taloudellisesti kannattavaa. Käyttö- ja materiaalikustannukset ovat alhaiset
- Kalliita muottiteriä ei enää tarvita./38/

4.3.5 Nuuttaus

Nuuttaus on paperiin tai kartonkiin painettu ura, jolla kontrolloidaan sen taittamista esim. pakkauslaatikoksi.

Federle ja Keller /36/ tutkivat nuuttauksen tekemistä lasersäteen avulla. Perinteisillä mekaanisilla nuuttausmenetelmillä ongelmana tahtoo olla nuuttausjäljen litistyminen varsinkin paksummilla materiaaleilla. Lasersäde sen sijaan poistaa hieman materiaalia kartongin pinnalta tehden pienen uran, joten litistymisongelmaa ei ole. Federle ja Keller nuuttasivat kartonkia 600 W hiilidioksidilaserilla 1500 m/min./36/

Lasernuuttauksen ongelmana on pakkausmateriaalin pintakerroksen poistuminen. Elintarvikekartongit on yleensä pinnoitettu vaikkapa muovilla. Pinnoitteen vioittaminen saattaa muuttaa pakkauksen ominaisuuksia. Esimerkiksi muovipinnoitteen nuuttaaminen laserilla saattaa vähentää pakkauksen nesteenpidätyskykyä.

4.4 Laserparametrien merkitys paperin ja kartongin leikkauksessa

Erilaisilla laserparametreilla on välitön ja suuri merkitys paperin ja kartongin laserleikkauksen onnistumisessa. Seuraavassa on käsitelty joitakin aiheeseen liittyviä artikkeleita ja tutkimuksia.

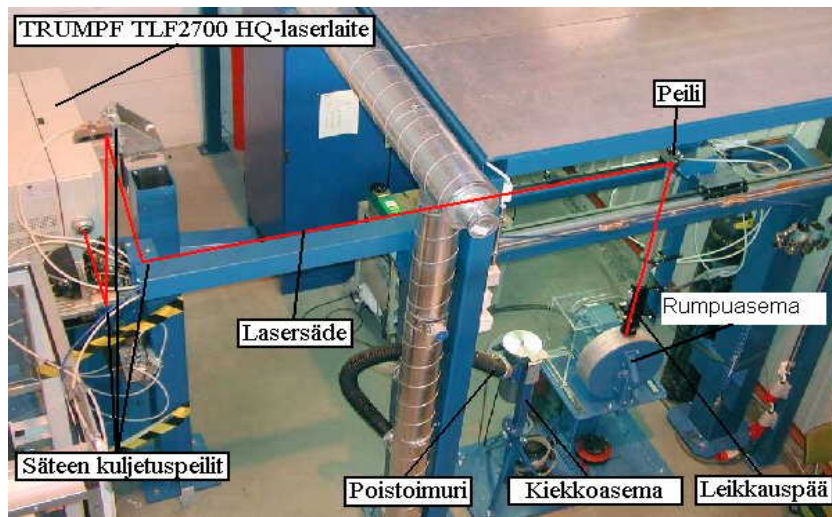
4.4.1 Laserteho

Malmberg /39/ tutki diplomityössään lasertehon vaikutusta erilaisten kuitupohjaisten materiaalien leikkauksnopeuteen. Työssä leikattiin taulukkoon I merkittyjä materiaaleja./39/

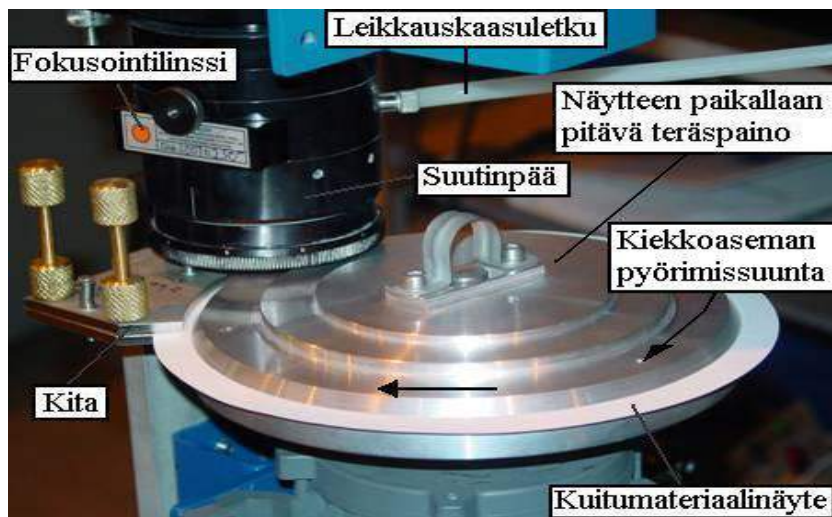
Taulukko I Malmbergin työssä tutkituille materiaaleille tehdyt leikkauskokeet./39/

Kuitu-materiaali	Neliömassa, g/m ²	Bulkki, cm ³ /g	Paksuus, µm	KAP, %	Leikkaus-koe 1	Leikkaus-koe 2	Leikkaus-koe 3
Koivusellu	100	1.3	150	94	x	x	x
Koivusellu	175	1.3	219	94	x	x	x
Koivusellu	175	1.3	239	94		x	
Koivusellu	175	1.2	209	94		x	
Koivusellu	175	1.3	219	20		x	
Koivusellu	175	1.3	219	50		x	
Koivusellu	175	1.3	219	100		x	
Koivusellu	250	1.2	307	94	x	x	x
Mäntysellu	100	1.5	152	94	x	x	x
Mäntysellu	175	1.4	239	94	x	x	x
Mäntysellu	175	1.4	239	20		x	
Mäntysellu	175	1.4	239	50		x	
Mäntysellu	175	1.4	239	100		x	
Mäntysellu	250	1.3	340	94	x	x	x
CTMP	100	2.8	298	92	x	x	x
CTMP	175	2.7	470	92	x	x	x
CTMP	175	2.7	470	20		x	
CTMP	175	2.7	470	50		x	
CTMP	175	2.7	470	100		x	
CTMP	250	2.6	643	92	x	x	x
Sellukartonki	170	1.3	215	91	x	x	x
Sellukartonki	250	1.3	330	92	x	x	x
Sellukartonki, kaoliini-päällyste	265	1.2	319	94	x	x	x
Sellukartonki, CaCO ₃ -päällyste	265	1.2	316	94	x	x	x
Sellukartonki	350	1.3	450	92	x	x	x
Päällystämätön CTMP-runkoinen kartonki	255	1.6	405	94	x	x	x
Päällystämätön CTMP-runkoinen kartonki	300	1.6	490	94	x	x	x

Taulukkoon I merkityn leikkauskoe 2:n tavoitteena oli saada selville leikkausnopeuden riippuvuus käytetystä lasertehosta. Näytteet leikattiin Trumpf TLF2700 HQ hiilidioksidilaserilla pyörivän kiekkoalustan päällä eri lasertehoilla siten, että laserlaitteen koko tehoalue käytiin tasaisin välein läpi siihen pisteeseen asti missä kiekkoaseman maksimipyörimisnopeus oli saavutettu, eikä onnistuneita leikkauksia enää saatu aikaan. Kunkin lasertehoarvon kohdalla etsittiin maksiminopeus, jolla leikkausrailo oli täydellisesti näytteen läpi. Kuvissa 32 ja 33 on työssä käytetty laserlaitteisto ja leikkauspäänsijoittelu./39/

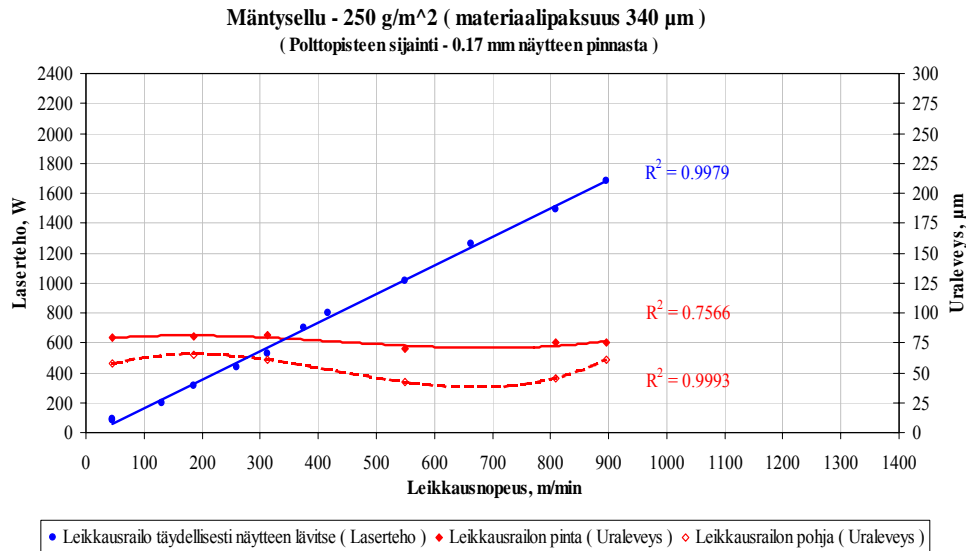


Kuva 32. Malmbergin työssä käytetty laserlaitteisto./39/



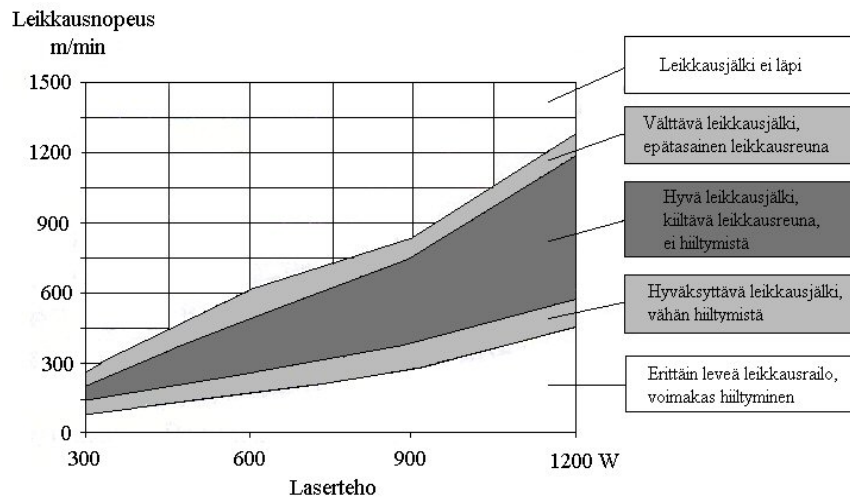
Kuva 33. Malmbergin työssä käytetty kiekkoasema./39/

Malmberg havaitsi, että leikkausnopeus on suoraan verrannollinen lasertehoon siten, että lasertehon kasvaessa myös leikkausnopeutta voitiin kasvattaa (kuva 34). Leikatun railon leveys puolestaan pysyi kutakuinkin vakiona, kun leikkausnopeutta ja tehoa kasvatettiin yhtä aikaa. Kun tehoa nostettiin tasaisesti yli sen minimitehon millä leikkaus menee jo täysin läpi pitäen leikkausnopeus vakiona, havaittiin uraleveyden vain kasvavan. Joillakin materiaaleilla todettiin leikkausreunan mustuvan hieman ylimääräisen tehon vaikutuksesta./39/



Kuva 34. Lasertehon vaikutus leikkausnopeuteen ja leikkausuran leveyteen./39/

Samanlaisia tuloksia ovat saaneet mm. Westington House Electric /24/ sekä Federle ja Keller /35/, jotka leikkasivat CO₂-laserilla offsetpaperia (kuva 35). He totesivat myös, että liiallinen laserteho leikkausnopeuteen nähden vain levensi leikkausuraa, leikkausjälki hiilti ja leikkaussavujen määrä lisääntyi huomattavasti./35/

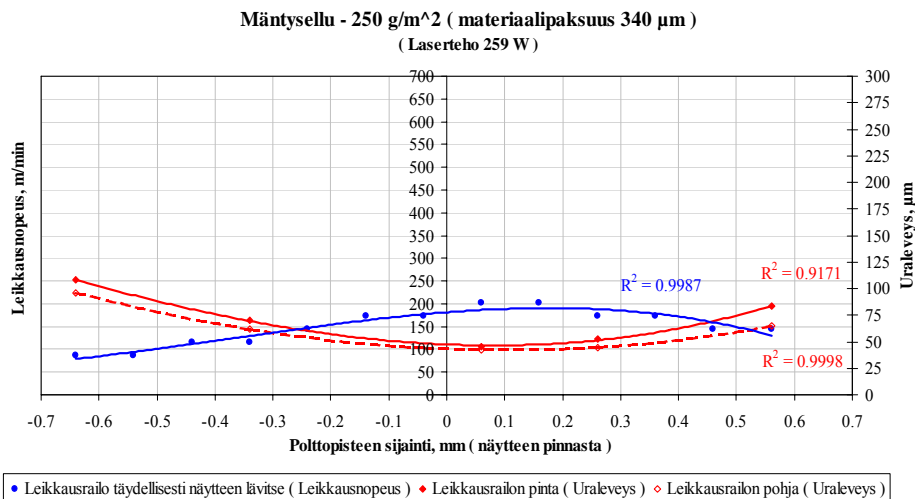


Kuva 35. Lasertehon suhde leikkausnopeuteen. Näytteenä oli 80 g/m² offset-paperia, jota leikattiin hiilidioksidilaserilla./35/

4.4.2 Lasersäteen fokusointi

Federlen ja Kellerin /35/ tutkimusten mukaan lasersäteen polttopisteen sijainnilla korkeussuunnassa leikattavaan paperiin nähden on suuri merkitys. Suurilla nopeuksilla leikattaessa paperirata saattoi liikkua polttopisteeseen nähden, jolloin leikkaus ei välttämättä onnistunut kunnolla. Tämän takia paperiradan tulisi olla tuettuna siten, että se ei pääse liikkumaan polttopisteeseen nähden./35/

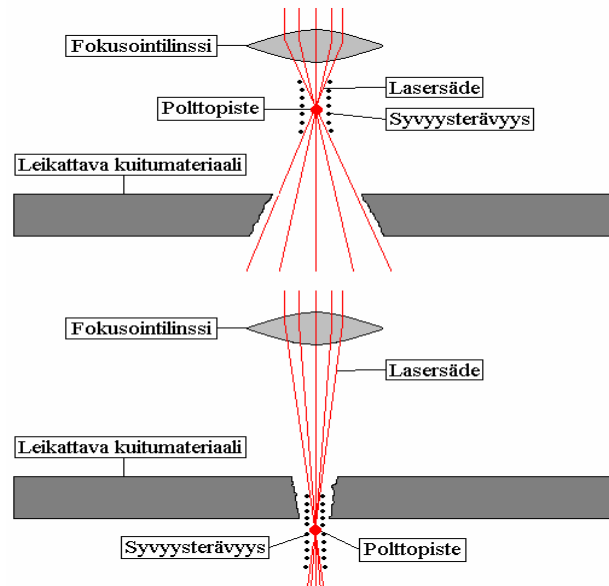
Ramsayn ja Richardsonin /25/ päällystetyn kartongin laserleikkaustutkimuksissa kokeiltiin leikkausta defokuksessa, jolloin havaittiin leikkausreunan kellastuvan. Kun kartonkia leikattiin optimifokuksessa, ei kellastumista havaittu. Samassa tutkimuksessa todettiin, että polttopiste tulisi asettaa yhden kolmanneksen verran kartongin sisään sen pinnasta lukien. Malmbergin /39/ tutkimuksessa paras leikkausnopeus saatiin kun fokus oli 0,1 – 0,4 mm materiaalin pinnan yläpuolella (kuva 36), tosin lasersäteen tehotiheysmaksimin havaittiin olevan 0,2 mm polttopisteen alapuolella. Polttopisteen siirtäminen tuntuvasti materiaalin pinnasta ylöspäin tai alaspäin pienensi leikkausnopeutta./25,39/



Kuva 36. Polttopisteen sijainnin vaikutus leikkausnopeuteen ja uraleveyteen./39/

Leikkausrailon uraleveys kasvoi tuntuvasti sekä uran poikkileikkauksen muoto muuttui V-kirjaimen muotoiseksi polttopistettä materiaalin pinnan alapuolelle siirrettäessä (kuva 37). Tällöin säteen syvyysterävyys ei ulottunut materiaalin koko paksuuden

matkalle. Kun polttopistettä siirrettiin materiaalin pinnan yläpuolelle, leikkausuran poikkileikkauksen muoto muuttui A-kirjaimen muotoiseksi./39/



Kuva 37. Leikkausuran poikkileikkauksen muodon muutos suhteessa polttopisteen ja syvyysterävyyden sijaintiin./39/

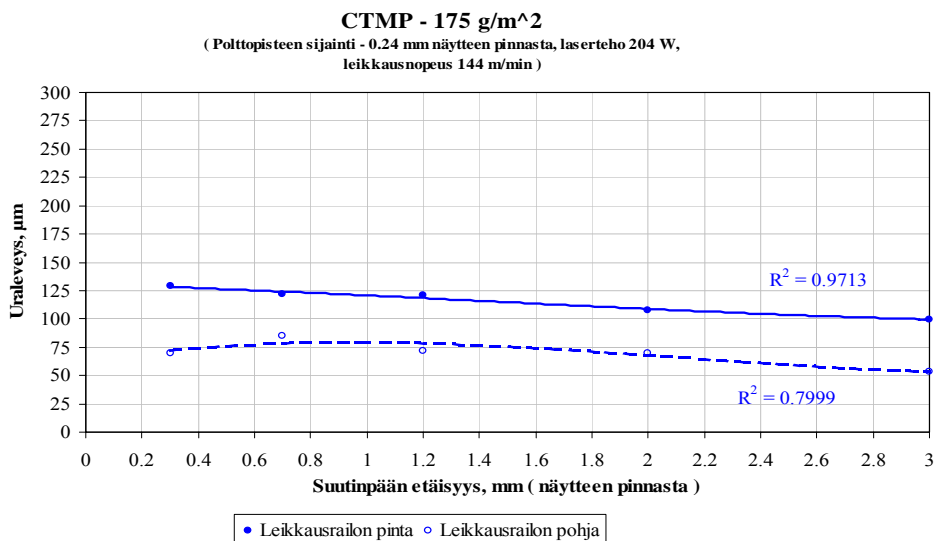
4.4.3 Leikkaussuuttimen asema

Ramsayn ja Richardsonin /25/ päällystetyn kartongin laserleikkaustutkimuksessa todettiin kartongin joustavuuden aiheuttavan ongelmia sen paikallaan pitämisen kannalta. Heidän mukaansa kartongin ylösalaisen liikkeen minimoimisella jännitysten avulla on rajansa. Niinpä kartongin pinnan paikka suuttimeen nähden määräytyy lähinnä kartongin ylä- ja alapuolisen savukaasun poiston aiheuttamien voimien summana. Jos esim. kartongin alapuolinen imu jostakin syystä heikkenee, kartonki saattaa siirtyä lähemmäs suutinta ja jopa joutua vahingolliselle Bernoullin alueelle./25/

Kun paineilmaa syötetään suuttimeen linssin alapuolelle koaksiaalisesti, se tulee ulos leikkaussuuttimesta lasersäteen kanssa avustaen leikkausta. Kun kartongin pinta on yli 2mm päässä suuttimen kärjestä, kaasun paine työntää kartonkia suuttimesta pois päin. Mutta jos kartongin pinnan ja suuttimen välinen etäisyys on alle 1 tai 2 mm, kaasun paine vetää kartonkia puoleensa Bernoullin ilmiön vaikutuksesta. Kartonki voi joutua siten kosketukseen suuttimen kanssa ja tukkia suuttimen rei'än. Tällöin savukaasuja ja

pölyä voi mennä leikkaussuuttimeen ja liata linssin alapintaa. Nämä likahiukkaset absorboivat lasersäteen energiaa. Linssi voi alkaa lämmetä ja lopulta se voi haljeta lämpölaajenemisen seurauksena. Koko tämä prosessi voi kestää vain 30 sekuntia. Ongelman voi välttää pitämällä suutin jatkuvasti noin neljän tai viiden millimetrin päässä kartongin pinnasta tai asentamalla suuttimen kärjen ja kartongin välille kytkimen, joka sammuttaa säteen, jos etäisyys menee liian pieneksi./25/

Malmbergin /39/ tuoreemmassa tutkimuksessa leikattiin kartonkia 2700 watin hiilidioksidilaserilla. Kokeissa käytettiin tyypeä leikkauskaasuna. Leikkauskaasun paine pidettiin 5 bar:ssa ja suuttimen korkeus 0,2 mm. Leikattavan kartongin päälle oli kuitenkin asetettu paino, joten näyte ei päässyt liikkumaan korkeussuunnassa (ks. kuva 33, kpl 4.4.1). Malmberg kokeili myös suuttimenkorkeuden vaikutusta CTMP-näytteen leikkausjäljen uraleveyteen, mutta vaikutus oli varsin pieni (kuva 38)./39/



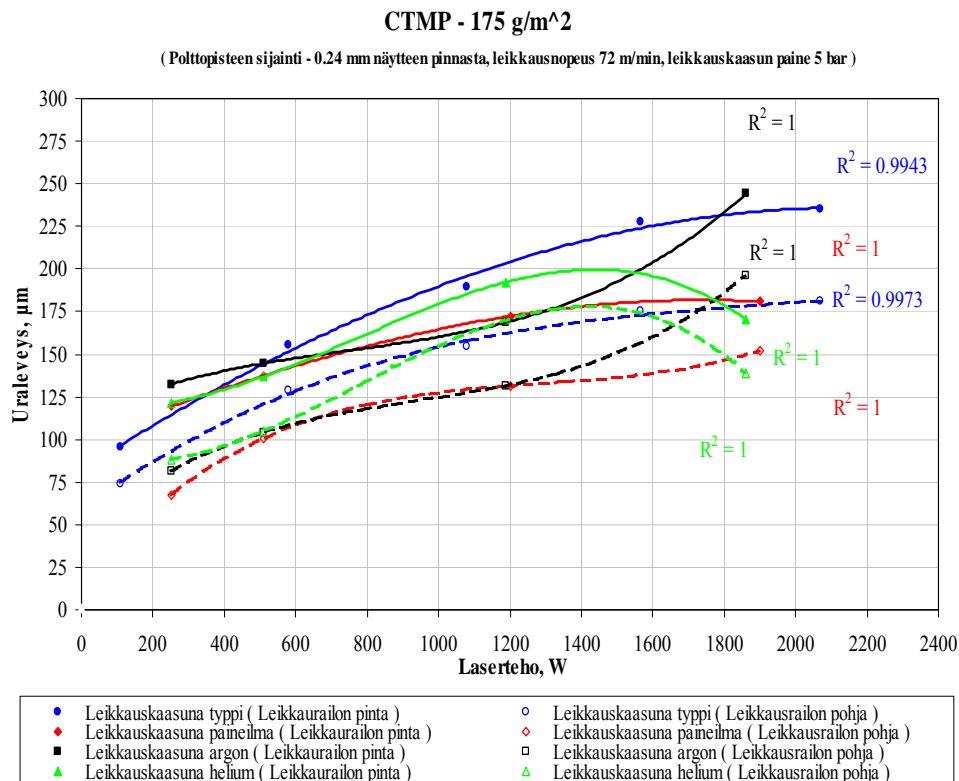
Kuva 38. Suutinpään etäisyyden vaikutus CTMP-näytteen leikkausjäljen uraleveyteen./39/

4.4.4 Leikkauskaasu ja sen paine

Hülsbusch /29/ tutki laserin käyttömahdollisuuksia paperin ja kartonkiteollisuudessa ja totesi, että koska laserleikkaus on luonteeltaan terminen tapahtuma ja leikattava materiaali helposti syttyvää, on suojakaasun käyttö välttämätöntä varotoimena. Myös Juselius /24/ mainitsee suojakaasun käytön välttämättömyyden tulipalovaaran takia./24,29/

Federlen ja Kellerin /35/ paperin laserleikkaustutkimuksessa todettiin, että leikkauskaasulla on varsin vähäinen merkitys itse leikkaustulokseen. Inerteillä kaasuilla, kuten tyypellä, heliumilla ja argonilla ei ollut toisistaan eroavia vaikutuksia leikkausprosessin kannalta. Myös leikkauskaasun paineen vaihtelu vaikutti vain vähäisesti leikkaustulokseen. Lopuksi todettiin, että leikkauskaasun pääasiallinen tehtävä paperin laserleikkauksessa on suojata linssiä likaantumiselta./35/

Malmbergin /39/ työssä kokeiltiin eri kaasujen vaikutusta leikkausuran leveyteen, kun kartonkia leikattiin vakionopeudella nostaen lasertehoa asteittain (kuva 39). Suuttimen korkeus oli 0,2 mm ja leikkauskaasun paine oli 5 bar. Tarkoituksena oli lähinnä selvittää osallistuuko kaasu leikkaukseen sitä rajoittavana tai edistävänä tekijänä. Saaduista tuloksista voi päätellä, että eri leikkauskaasut eivät eronneet juurikaan toisistaan vaikutukseltaan./39/

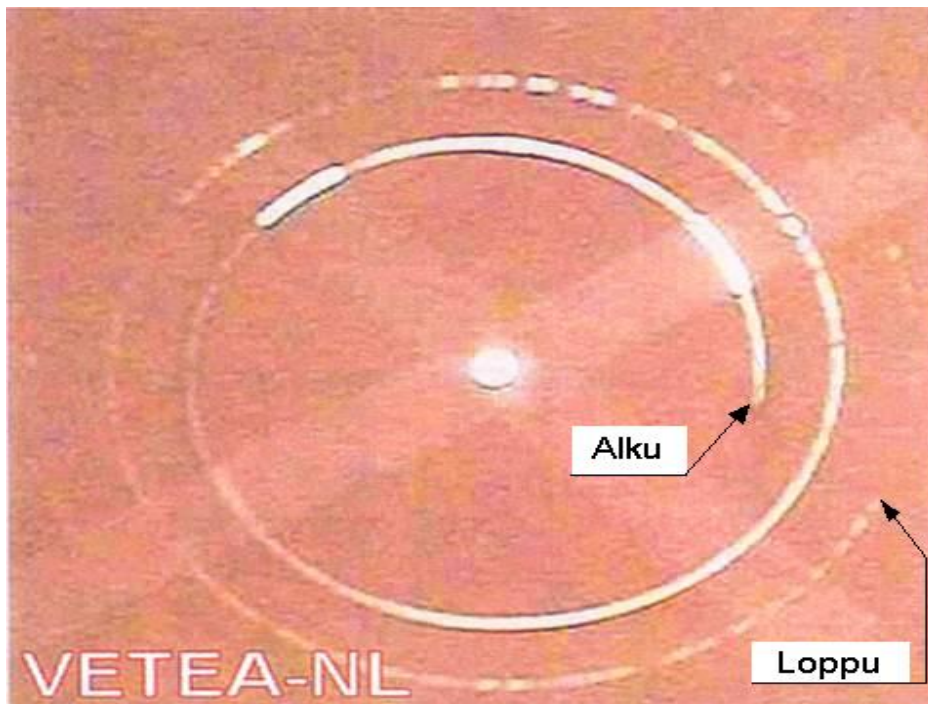


Kuva 39. Laserleikkauksessa käytettävän leikkauskaasulajin vaikutus CTMP-näytteiden leikkausjäljen uraleveyteen./39/

Jooren ja Hüsslagen /40/ tutkimuksessa leikattiin 1700 watin CO₂-laserilla 550-1650 g/m² painoista kartonkia. Näytteiden paksuudet vaihtelivat vastaavasti välillä 0,8-2,2 mm. Laitteiston linssin polttoväli oli 100 mm ja polttopisteen koko 0,25 mm. Leikkauksissa säde fokuoitiin kartongin pintaan. He leikkasivat kartonkia pyörivällä alustalla spiraalin muotoon siirtämällä leikkauksen kuluessa leikkauspäätä kartonkinäytteen säteen suuntaisesti kohdasta 50 mm, keskustasta lukien, kohtaan 120 mm (kuvat 40 ja 41). Leikkausnopeus oli näin mahdollista laskea kehänopeudesta spiraalin muotoisen leikkausuran jokaisella pisteelle, koska leikkausnopeus tietenkin kasvaa ulkokehälle päin siirryttäessä kun kierrosluku pysyy samana./40/

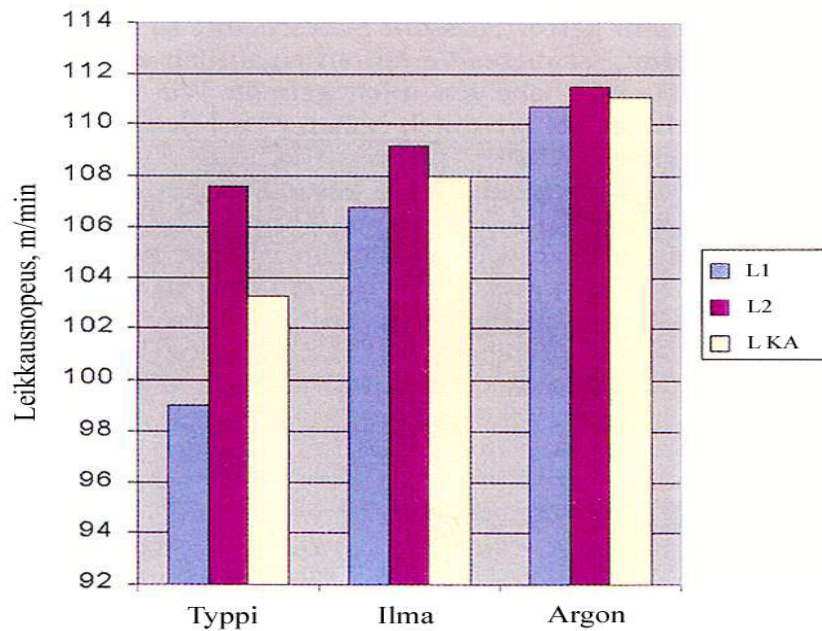


Kuva 40. Jooren ja Hüsslagen työssä käytetty leikkauspää ja leikattavan kartongin asettelu./40/



Kuva 41. Jooren ja Hüsslagen työssä kartonkia leikattiin spiraalin muotoon./40/

Joore ja Hüsslage kokeilivat leikkauskaasun laadun vaikutusta kartongin leikkausnopeuteen. Leikkauskaasuina he kokeilivat typpeä, ilmaa ja argonia. Kaasun paine oli kaikkien kokeiden aikana 20 bar. Kuvassa 42 näkyvissä tuloksissa L1 on sen kohdan nopeus spiraaliuralla, jossa leikkaus ei ensimmäistä kertaa ole mennyt täysin läpi kartongista. L2 on kohta, jossa leikkaus ei ole mennyt täysin läpi toisen kerran. /40/



Kuva 42. Eri leikkauskaasujen vaikutus 750 g/m^2 painoisen kartongin laserleikkausnopeuteen. Kaasunpaine oli 20 bar./40/

Heidän piti käyttää kokeessa 750 g/m^2 painoista ja 1,0 mm paksuista kartonkia, jotta leikkausnopeudelle saatiin minkäänlaista eroavaisuutta eri kaasujen välillä. Tällöin vaikutus oli selvästi näkyvässä. Argonilla saavutettava leikkausnopeuden kasvu oli niin pieni (max. n. 10 %), että sen käyttö ei ollut taloudellisesti järkevää kaasun kalleudesta johtuen./40/

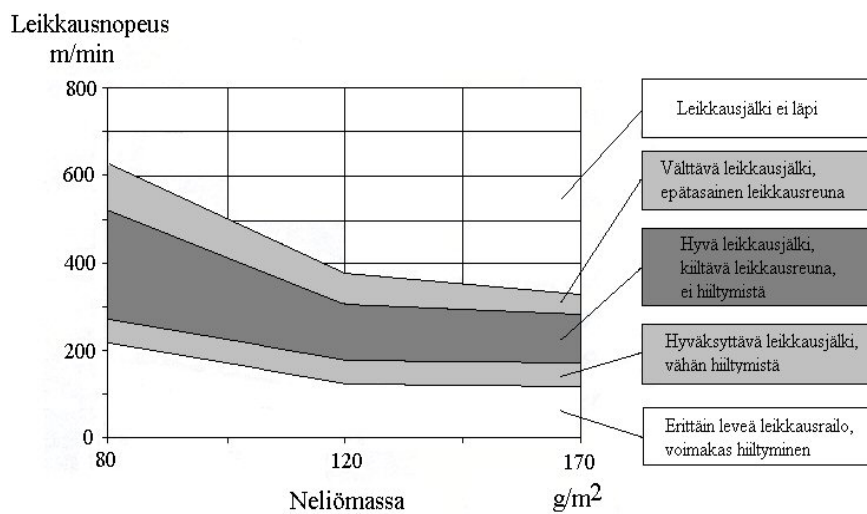
4.4.5 Moodi

Ricklin /41/ mukaan paperin ja kartongin laserleikkausnopeus nousee lasertehoa nostettaessa ainoastaan kun säteen tehotiheysjakauma pysyy samana. Laserleikkauksessa suositetaan lasereita joiden moodijakauma on mahdollisimman lähellä TEM_{00} :aa, koska tämä moodijakauma on parhaiten fokuoitavissa ja tuottaa pienimmän polttopisteen ja sitä kautta suurimman tehotiheyden ja leikkausnopeuden./41/

4.5 Materiaalin vaikutus paperin ja kartongin laserleikattavuuteen

4.5.1 Leikattavan materiaalin paksuus, neliömassa ja tiheys

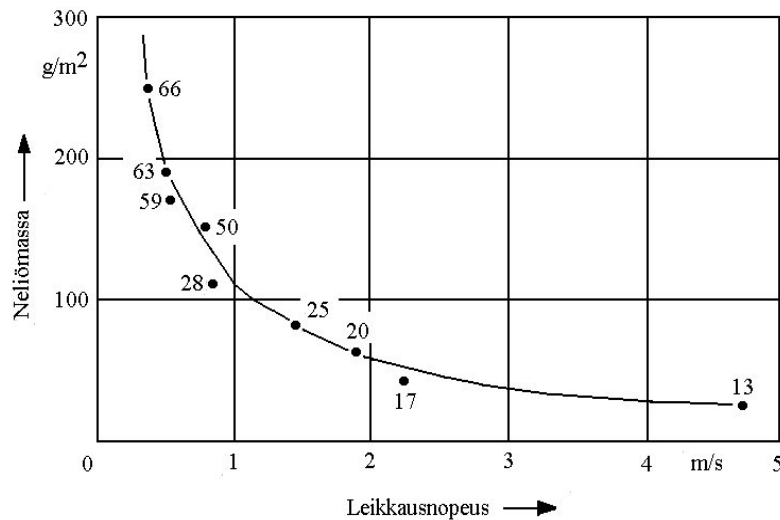
Leikattavan materiaalin paksuus lienee tärkein yksittäinen materiaaliominaisuus, joka vaikuttaa sen laserleikkausnopeuteen. Federlen ja Kellerin /35/ tutkimuksissa leikattiin 600 W:n CO₂-laserilla 80-170 g/m² painoista offset-paperia. Heidän tuloksensa on esitetty kuvassa 43./35/



Kuva 43. Offset-paperin CO₂-laserleikkausnopeuden riippuvuus neliömassasta, kun käytetty laserteho oli 600 W./35/

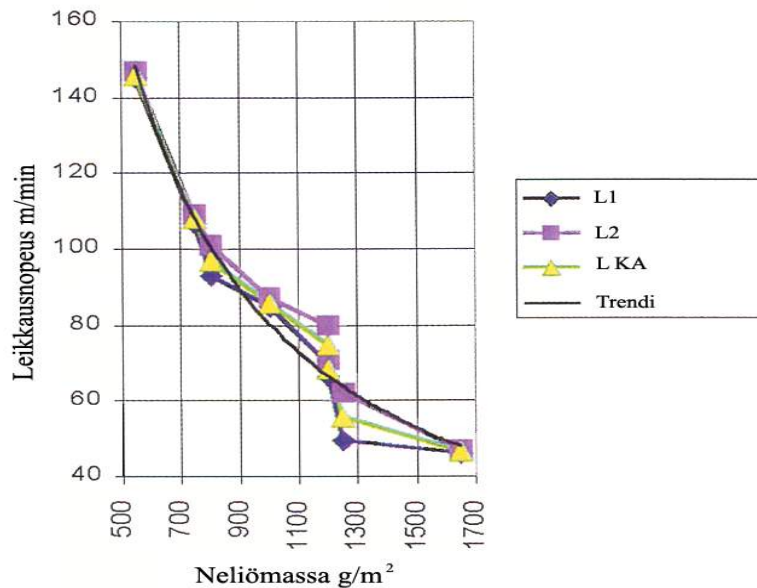
Federlen ja Kellerin mukaan leikkausnopeus ei ole suoraan verrannollinen leikattavan materiaalin neliömassaan vaikkakin leikkausnopeus alenee materiaalin neliömassan lisääntyessä. Neliömassalla ei ollut vaikutusta leikkausjälkeen tai leikkausuran leveyteen. Neliömassan kasvaessa leikkausprosessi reagoi herkemmin lasertehon vaihteluihin./35/

Hülsbuschin /29/ mukaan paperin ja kartongin laserleikkaukseen käytetty teho on suoraan verrannollinen leikkausnopeuteen, joka kuitenkin laskee nopeasti neliömassan kasvaessa (kuva 44)./29/



Kuva 44. Neliömassan ja leikkausnopeuden välinen yhteys leikattaessa paperia CO₂-laserilla. Kokeissa on käytetty yhdeksää eripaksuista paperia ja kartonkia./29/

Jooren ja Husslagen /40/ kartongin laserleikkaustutkimuksessa leikattiin 500-1700 g/m² painoista kartonkia 1700 W:n hiilidioksidilaserilla. Neliömassan vaikutus leikkausnopeuteen on selvästi nähtävissä kuvassa 45. He eivät kuitenkaan osaa selittää leikkausnopeuden vaihteluita ja ehdottavatkin lisäkokeita./40/



Kuva 45. Neliömassan vaikutus kartongin laserleikkausnopeuteen. Näissä tuloksissa L1 on sen kohdan nopeus spiraaliuralla, jossa leikkaus ei ensimmäistä kertaa ole mennyt täysin läpi kartongista. L2 on kohta, jossa leikkaus ei ole mennyt täysin läpi toisen kerran./45/

Huolimatta siitä, että mittaustietoa ei ehkä ollut tarpeeksi he kuitenkin uskalsivat johtaa neliömassan, leikkausnopeuden ja lasertehon välille seuraavan yhtälön;

$$\text{Leikkausnopeus (m/min)} * \text{Neliömassa (g/m}^2\text{)} = 50 * \text{Laserteho (W)} \quad (4)$$

Arvo 50 vaihtelee välillä 44-56./40/

Myös Malmberg /39/ päätyy työssään samoihin tuloksiin kuin edelliset tutkijat. Kuitumateriaalin neliömassan kasvaessa samalla lasertehon arvolla saavutettiin pienemmät leikkausnopeudet. Materiaalipaksuuden kasvaessa haihdutettavan materiaalin määrä kasvoi ja tähän kuului enemmän lasertehoa. Laserleikkausnopeutta ja lasertehoa lisättäessä kuitumateriaalin paksuuden ja neliömassan kasvaessa uraleveys sekä leikkausrailon pinta- ja pohjauran välinen ero kasvoi. Tämä johtuu siitä, että suurempi lasertehon määrä osui koivusellunäytteen pintapuolelle kuin pohjapuolelle ja näin pintapuolelle muodostui leveämpi leikkausura./39/

4.5.2 Päällysteen vaikutus paperin ja kartongin laserleikattavuuteen

Päällysteen vaikutus paperin ja kartongin laserleikattavuuteen on vähän, jos ollenkaan aikaisemmin tutkittu asia ja tämän diplomityön varsinainen aihe. Vaikka aikaisempia tutkimuksia ei juuri olekaan, on niistä saatu joitakin viitteitä päällysteen vaikutuksista. Nämä vaikutukset ovat pääsääntöisesti leikkausta vaikeuttavia. Koska moni laserleikkaukseen soveltuvaksi ajateltu paperi ja kartonki on kuitenkin päällystetty, on päällysteen vaikutuksia kuitumateriaalien laserleikattavuuteen syytä tutkia vakavasti.

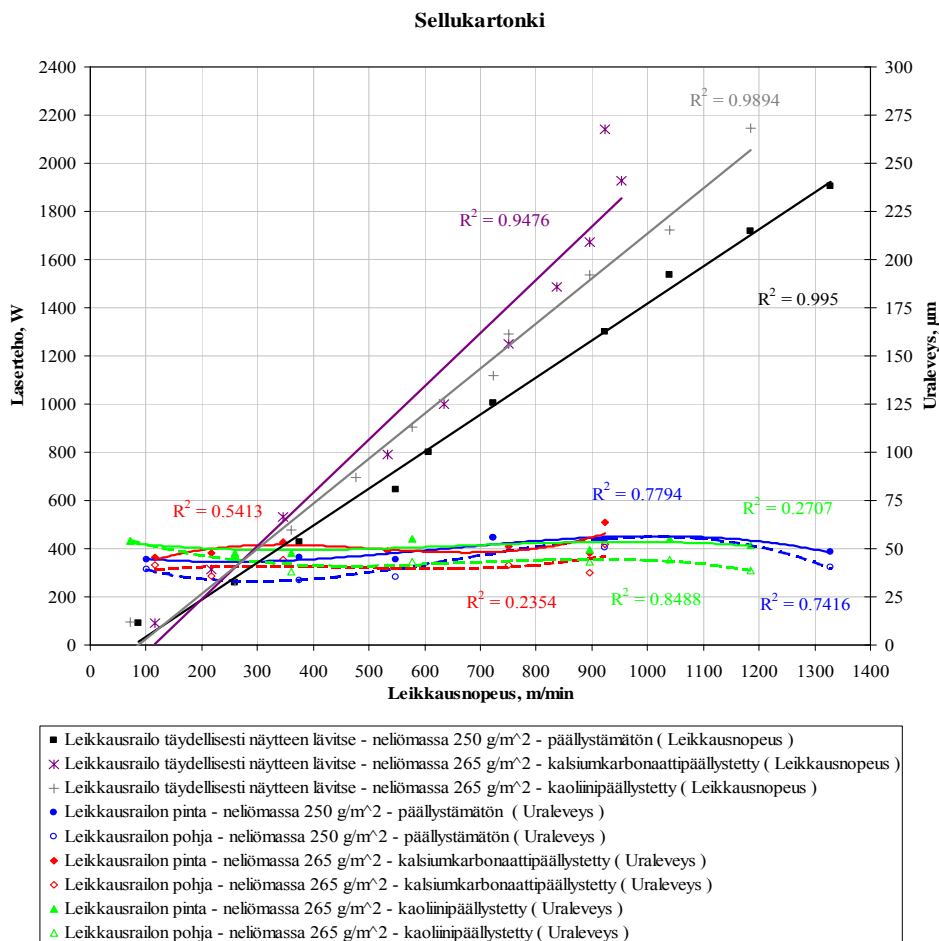
Federlen ja Kellerin /35/ tutkimusten mukaan eri paperilaatujen laserleikattavuuden välillä ei ollut merkittäviä eroja. Päällystettyjä papereita leikattaessa leikkausjälki värjäytyi ja savua muodostui jonkin verran päällysteen laadusta riippuen. Leikkausparametreja muuttamalla ja kunnollisella savukaasun poistolla nämä ongelmat olivat vältettävissä./35/

Ainsworthin /22/ päällystetyn paperin laserleikkaustutkimuksissa ei mainittu päällystyksellä olevan mitään vaikutusta leikkaustulokseen. He mainitsevat vain, että

leikkauksessa jäävät palamattomat päällysteen partikkelit olisi jotenkin poistettava leikkauksijäljestä./22/

Ramsayn ja Richardsonin /25/ päällystetyn kartongin laserleikkaustutkimuksessa todettiin, että projektia ei voitu toteuttaa käytännössä koska leikkauksessa muodostuneita suuria kaoliini- ja palamisjätteen määriä ei voitu kunnolla hallita ja kerätä.

Malmbergin /39/ työssä tutkittiin lyhyesti päällystykseen vaikutusta kartongin laserleikkattavuuteen./39/



Kuva 46. Leikkausnopeuden vaikutus sellukartonkinäytteiden, jotka olivat päällystämättömiä sekä kalsiumkarbonaatti- ja kaoliinipäällysteisiä, laserleikkauksessa tarvittavaan lasertehtoon./39/

Malmbergin mukaan kuva 46 osoittaa, että sellukartonkinäytteiden päällystäminen vaikutti siten, että samalla laserleikkausnopeudella päällystetyt näytteet tarvitsevat enemmän lasertehoa kuin päällystämätön sellukartonki. Osa lasersäteen tehosta kului päällysteen höyrystämiseen, jolla oli erilainen höyrystymislämpö kuin kuitumateriaalilla ja osa säteestä heijastui sekä sirosi päällysteen pinnasta. Kuitumateriaalien päällystyksessä käytettävillä mineraalipohjaisilla päällysteillä on yleensä korkea taitekerroin./39/

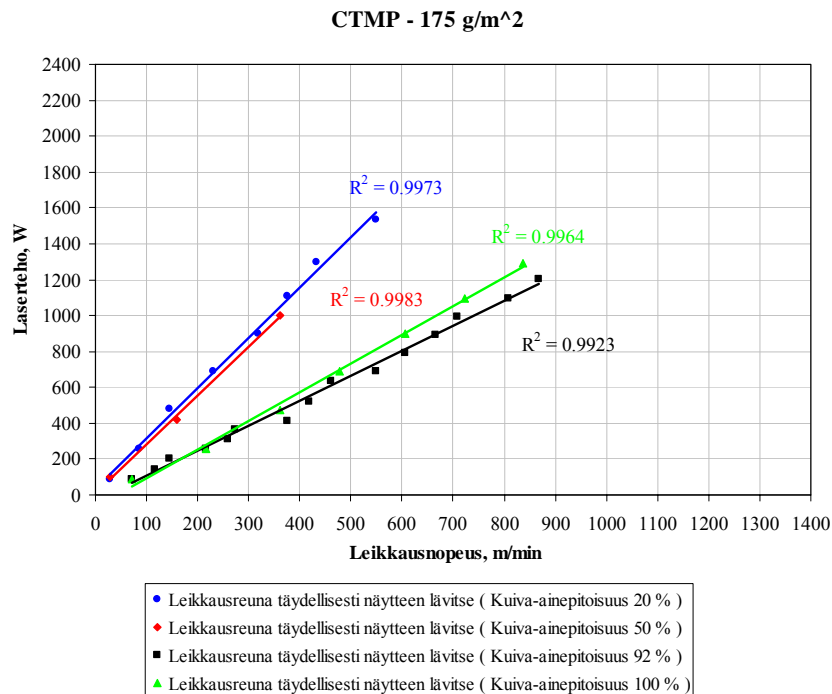
Leikkausrailon uraleveyteen päällysteellä ei kuitenkaan sellukartonkien tapauksessa ollut vaikutusta. Uraleveys pysyi vakiona leikkausnopeutta sekä tarvittavaa lasertehoa nostettaessa. Tulos oli samantyylinen kuin aiemmin muidenkin kuitumateriaalien kohdalla havaittiin./39/

Kalsiumkarbonaattipäällystetty sellukartonki vaati samalla leikkausnopeudella enemmän lasertehoa kuin kaoliinipäällystetty. Tämä johtuu siitä, että kalsiumkarbonaatti hajoaa lämpötilassa 815 °C kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Reaktio on endoterminen eli vaatii energiaa. Korkeissa lämpötiloissa myös kaoliinin rakenne muuttuu, sillä kaoliinin kidevesi hajoaa. Tämän kideveden hajoaminen kuitenkin ei kuluta energiaa siinä määrin kuin kalsiumkarbonaatin hajoaminen. Näin ollen kalsiumkarbonaattipäällystettyjen näytteiden leikkauksen tarvitsema kokonaisteho oli suurempi kuin kaoliinipäällysteisen sellukartongin./39/

Kuvasta voidaan myös huomata, että tietyssä pisteessä lasertehon nostaminen ei enää lisää leikkausnopeutta karbonaattipäällystettyä kartonkia laserilla leikattaessa. Leikkausnopeus saattaa jopa kääntyä laskuun. Selitystä tälle ilmiölle ei kuitenkaan ollut annettu.

4.5.3 Materiaalin kuiva-ainepitoisuus

Malmbergin /39/ kokeili kuiva-ainepitoisuuden (KAP) vaikutusta kartongin laserleikattavuuteen. Tämän kokeen tulokset on esitetty kuvassa 47./39/



Kuva 47. Lasertehon vaikutus kuituraaka-ainenäytteiden, joilla oli eri kuiva-ainepitoisuus, laserleikkauksessa tarvittavaan leikkausnopeuteen./39/

Kuiva-ainepitoisuuden laskiessa tietyn leikkausnopeuden saavuttamiseksi tarvittava laserteho kasvoi, koska materiaalissa olevan kosteuden höyrystämiseen kului lasertehoa. Toisaalta täysin kuiva näyte (KAP 100 %) vaati enemmän tehoa kuin esim. jos kuiva-ainepitoisuus oli 94 %. Tämä saattoi johtua siitä, että näytteet ehtivät absorboida jonkin verran kosteutta ilmasta ja näytteen kuiva-ainepitoisuus oli sen takia epähomogeeninen. Toisaalta näytteen lujuusominaisuudet saattoivat kärsiä, kun sitä kuivattiin korkeassa lämpötilassa./39/

4.5.4 Kuitumateriaalin laadun vaikutus laserleikattavuuteen

Malmberg /39/ vertaili diplomityössään CTMP-, koivu- ja mäntysellupohjaisten kartonkien laserleikattavuutta. Hän havaitsi, että CTMP-pohjaiset kartongit vaativat enemmän lasertehoa tietyn leikkausnopeuden saavuttamiseksi. Tämä johtui Malmbergin mukaan siitä, että sellut sisälsivät puun keitossa erottuneita pitkiä kuituja, kun taas CTMP sisälsi lähes kaikki puun alkuperäiset ainesosat, kuten uute- ja hienoaineita sekä ligniiniä. Näiden ainesosien höyrystäminen kulutti enemmän

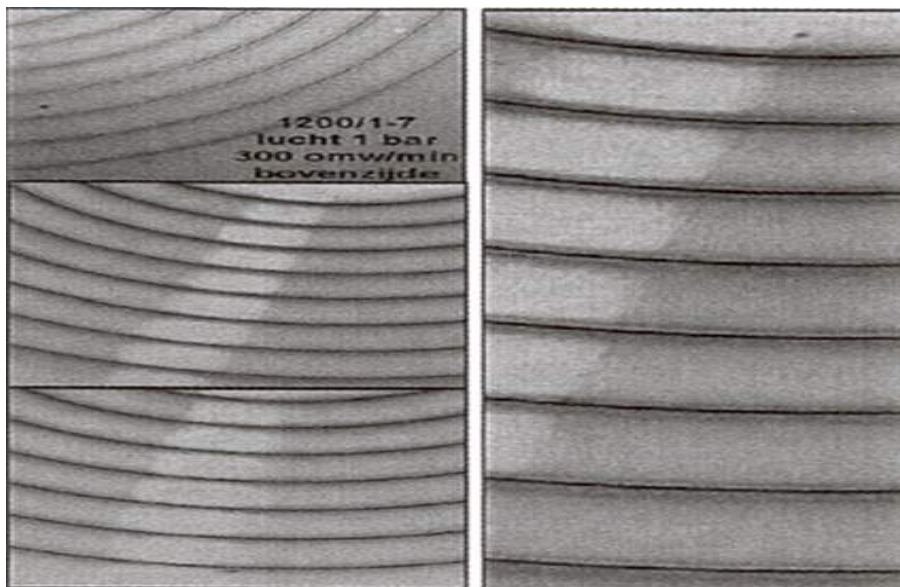
lasertehoa kuin pitkien kuitujen höyrystäminen, jolloin samalla lasertehon arvolla CTMP-pohjaisilla näytteillä saavutettiin pienempi leikkausnopeus./39/

4.6 Laserleikkauksen vaikutus paperin ja kartongin ominaisuuksiin

Ainsworthin /22/ motivaatio paperin laserleikkaustutkimukseen oli tavanomaisen teräleikkurin synnyttämän leikkuujäljen varsin heikko laatu, mikä saattoi syntyä hyvinkin lyhyessä ajassa. Mikroskooppitutkimuksissa todettiin, että laserleikatussa paperinreunassa ei ollut irtonaisia kuituja toisin kuin mekaanisesti leikatussa reunassa. Leikatussa reunassa ei todettu värjäytymistä, kun laser toimi normaalisti. Lisäksi laserleikattu paperi oli täydellisesti kierrätettävissä./22/

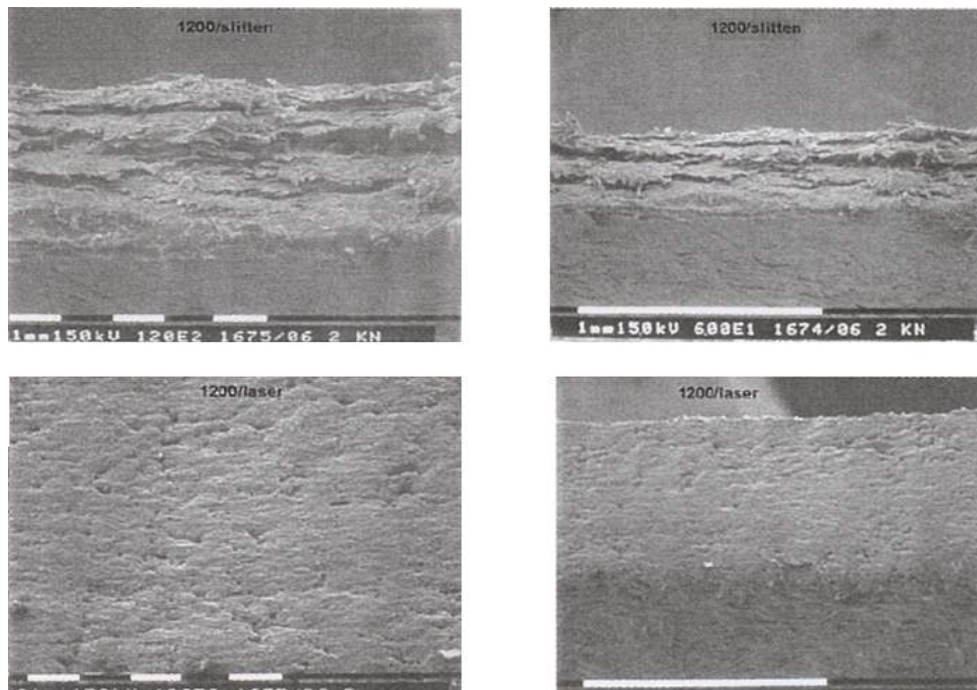
Federlen ja Kellerin /36/ tutkimuksissa vertailtiin mekaanisesti ja laserilla leikattujen papereiden leikkausjäljen laatua. He totesivat, että mekaanisesti leikatun paperin reuna oli epätasainen, kun taas laserilla leikattu reuna oli tasainen ja sileä. Mekaanisesti leikatussa reunassa oli lisäksi irtonaisia kuituja, joiden seurauksena paperin repäisylujuus aleni./36/

Joore ja Hüsslage /40/ eivät olleet täysin tyytyväisiä laserilla leikkaamiensa kartonkien leikkausjälkeen. Pintapuolelta leikkausjäljen reuna harmaantui vaikkakin värjäntyminen oli vähäisempää leikkausnopeuden kasvaessa (kuva 48). Kuivalla kankaalla oli mahdollista poistaa paljonkin värjäntymiä, mutta aivan leikkausjäljen kohdalla värjäymät olivat pysyviä./40/



Kuva 48. Jooren ja Hüsslagen leikkaamien kartonkien leikkausjäljet värjäytyivät./40/

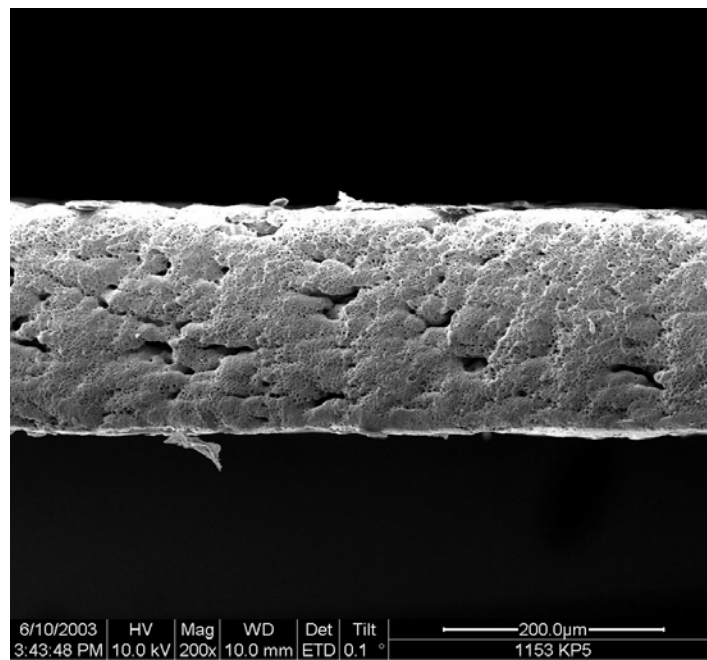
Laserilla leikatun leikkausreunan mekaaninen laatu oli kuitenkin kaikissa tapauksissa parempi kuin mekaanisella leikkurilla leikatun (kuva 49)./40/



Kuva 49. Pituusleikkurilla (2 ylintä) ja laserilla leikatun kartongin reunan mikroskooppia kuvia. 600 g/m² kartonkia leikattu 1700 W:n hiilidioksidilaserilla./40/

Malmbergin /39/ työssä analysoitiin laserleikattujen kuitumateriaalien leikkausrailon purseen ja mustumisen määrää tarkastelemalla kuitumateriaalien leikkausurasta (näytteen pinta- ja pohjapuolelta) sekä leikkausreunasta (näytteen kone- ja poikkisuuntaan) otettuja mikroskooppikuvia visuaalisesti. Purseen ja mustumisen määrä ei olennaisesti näyttänyt lisääntyvän lasertehoa nostettaessa. Poikkeuksena CTMP-näytteillä ja päällystämättömällä CTMP-runkoisella nestepakkauskartongilla mustuminen lisääntyi olennaisesti lasertehoa nostettaessa./39/

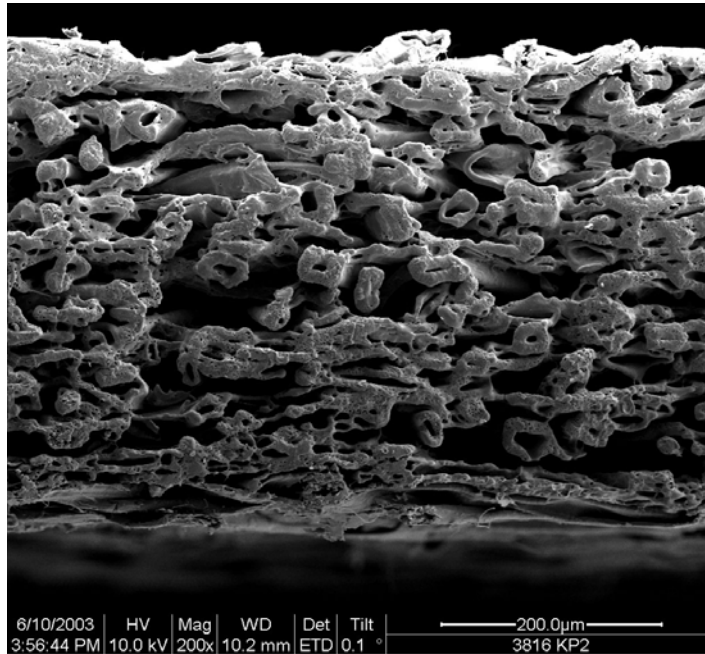
Työssä otettiin myös laserleikattujen kuitumateriaalien leikkausreunoista pyyhkäisyelektronimikroskooppilla kuvia. Näistä havaittiin, että kaikilla kuitumateriaaleilla leikkausreuna oli sileä ja tasainen. Sellu- ja sellukartonkinäytteillä leikkausreuna oli selvästi ikään kuin sulanut sekä täten visuaalisesti arvioiden sulkeutunut hyvin (kuva 50)./39/



Kuva 50. Laserleikatun mäntysellunäytteen leikkausreunan pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva, kun neliömassa oli 175 g/m^2 , materiaalipaksuus $239 \text{ }\mu\text{m}$, käytetty laserteho 86 W ja leikkausnopeus 144 m/min ./39/

CTMP ja päällystämättömien CTMP-runkoisten nestepakkauskartonkinäytteiden leikkausreunassa näkyi yksittäisiä kuituja ja leikkausreuna oli avoin. Päällystettyjen sellukartonkien pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvissa näkyi leikkausreunan pinnalla

valkoista pölyä, joka koostui päällysteen sisältämistä pigmenttihiukkasista (kuva 51)./39/



Kuva 51. Laserleikatun CTMP-näytteen leikkausreunan pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva, kun neliömassa oli 175 g/m^2 , materiaalipaksuus $470 \text{ }\mu\text{m}$, käytetty laserteho 90 W ja leikkausnopeus 72 m/min ./39/

4.7 Paperin ja kartongin laserleikkauksessa syntyvät pölyt ja kaasut

Yhtenä päämotiivina paperin ja kartongin laserleikkaukselle on vähentää mekaanisessa leikkauksessa syntyvää ns. paperipölyä, joka puolestaan aiheuttaa painokoneella likaantumista, katkoja ja edelleen lisääntyntä pesun tarvetta. Toisaalta laserleikkauksen yhteydessä nousee esiin kysymys siinä syntyvien savukaasujen luonteesta ja määrästä leikkauksen termisestä luonteesta johtuen.

Ainsworthin /22/ päällystetyn paperin laserleikkaustutkimuksissa ongelmaksi muodostui leikkauksessa syntyvien palamisjätteiden keräys ja poisto. Hän laski, että 160 g/m^2 molemmiin puolin päällystettyä taidepaperia laserilla leikattaessa 200 m/min syntyy palamistuotteita $3,2 \text{ g/min}$. Tästä määrästä oli $1,02 \text{ g/min}$ palamattomia ja $2,18 \text{ g/min}$ palavia. Näiden palavien tuotteiden muodostaman kaasun tilavuudeksi hän laski $24,6 \text{ l/min}$ $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Lämpötilaksi hän arvioi kaoliinin sulamislämpötilan, koska monet palamattomista partikkeleista olivat lähes täydellisen pallonmuotoisia./22/

Ramsayn ja Richardsonin /25/ tutkimuksessa oltiin pitkälti samoilla linjoilla Ainsworthin kanssa. Myös heidän mielestään palamistuotteiden poisto leikkausalueelta vaatii huomiota. Heidän laskelmiensa mukaan 150 µm leikkausurasta muodostui 100 m/min keikkausnopeudella 4,5 g/min palamistuotteita, josta noin 0,5 g/min oli palamatonta päällystepigmenttiä, tässä tapauksessa kaoliinia. Kaoliinipartikkeleiden keskimääräiseksi kooksi arvioitiin 1-5 µm halkaisijaltaan. Loput 4 g/min muuttui kaasuiksi, joiden tilavuus oli noin 55 l/min ja lämpötila 2000 °C. He arvioivat lämpötilan hieman korkeammalle kuin Ainsworth, perustaen laskelmansa leikkauksessa uran yläpuolelle muodostuneen liekin siniseen väriin. Väriin arveltiin johtuvan kaoliinin termoionisesta emissiosta 2000 °C:n lämpötilassa./25/

Ramsayn ja Richardsonin mukaan savukaasujen poisto on välttämätöntä lähinnä niiden suuren määrän takia. Aromaattisia hiilivetyjä ei juuri havaittu ja formaldehydin, akroleiinin ja krotonaldehydin määrät pysyivät selvästi alle teollisuuden turvallisuusmääräysten asettamien rajojen. Suurin osa syntyvästä kaasusta oli hiilidioksidia./25/

5 TÄYTE- JA PÄÄLLYSTEPIGMENTIT PAPERIN JA KARTONGIN VALMISTUKSESSA

Aikaisemmissa paperin ja kartongin laserleikkaukskokeissa on havaittu täyte- ja päällystepigmenttien alentavan saavutettavaa maksimileikkauksnopeutta tietyllä teholla. Seuraavissa kappaleissa valaistetaan pintapuolisesti paperin ja kartongin täytön, päällystyksen sekä niissä käytettävien pigmenttien merkitystä.

Paperin täyteaineet ovat hienojakoista valkoista pigmenttijauhetta. Niitä valmistetaan luonnon mineraaleista tai synteettisesti erilaisista raaka-aineista. Useimmat paperilaadut sisältävät täyteaineita. Täyteaineita käytetään pääasiassa kahdesta syystä;

- Kuitujen väliset raot täyttyvät, jolloin paperin pinnasta tulee sileämpi. Samalla paperin formaatio, painettavuus, opasiteetti, dimensiostabiliteetti ja optiset ominaisuudet paranevat.

- Valmistuskustannukset alenevat, koska suurin osa täyteaineista on halvempia kuin kuidut./42/

Täyteaineilla on myös ei toivottuja vaikutuksia paperiin ja paperin valmistukseen. Nämä haittavaikutukset liittyvät kuitujen välisten sidosten heikkenemiseen. Käytännössä tämä ilmenee alentuneena vetolujuutena ja jäykkyytenä sekä pölyämisenä painokoneella. Kemikaalien kulutus nousee paperikoneella ja huono retentio voi aiheuttaa paperin kaksipuolisuutta. Lisäksi täyteaineet voivat lisätä paperikoneen kulumista./42/

5.1 Täyteaine vs. päällystyspigmentti

Terminologia täyteaineen ja pigmentin välillä on hieman epäselvä. Pääsääntöisesti täyteaine liittyy paperin täyttöön ja pigmentti on korkealaatuinen lisäaine. Minerologian kannalta tyypilliset täyteaineet ja päällystyspigmentit ovat samaa alkuperää, mutta päällystyspigmentit on yleensä jalostettu hienompijakoisiksi ja vaaleammiksi. Korkeammat laatuvaatimukset on asetettu myös pigmenttien reologialle, valonsironnalle ja peitto-ominaisuuksille. Päällystepigmentit on yleensä tarkemmin jaoteltu ja siksi myös kalliimpia./42/

5.2 Tärkeimmät täyte- ja päällystepigmentit

5.2.1 Kalsiumkarbonaatti

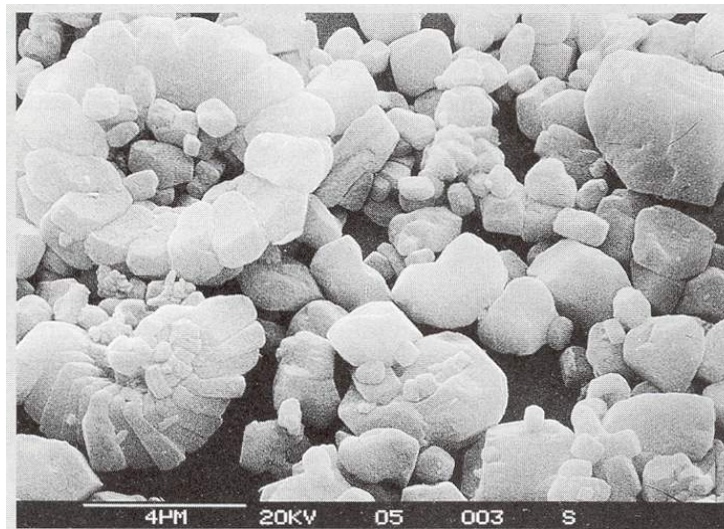
Kalsiumkarbonaatti (CaCO_3) voidaan jakaa kahteen yleisluokkaan. Luonnon kalsiumkarbonaatti tehdään jauhamalla kalkkikiveä (GCC) ja saostamalla saadaan synteettistä kalsiumkarbonaattia (PCC)./42/

Kalsiumkarbonaattia esiintyy runsaasti erilaisissa luonnon mineraaleissa. Suurin osa kalsiumkarbonaattimineraaleista on peräisin 70-130 miljoonaa vuotta sitten eläneistä fossiloituneista meriorganismeista. Luonnon kalsiumkarbonaatti on yleistä Euroopassa ja sitä onkin käytetty paljon alkalisessa paperinvalmistuksessa./42/

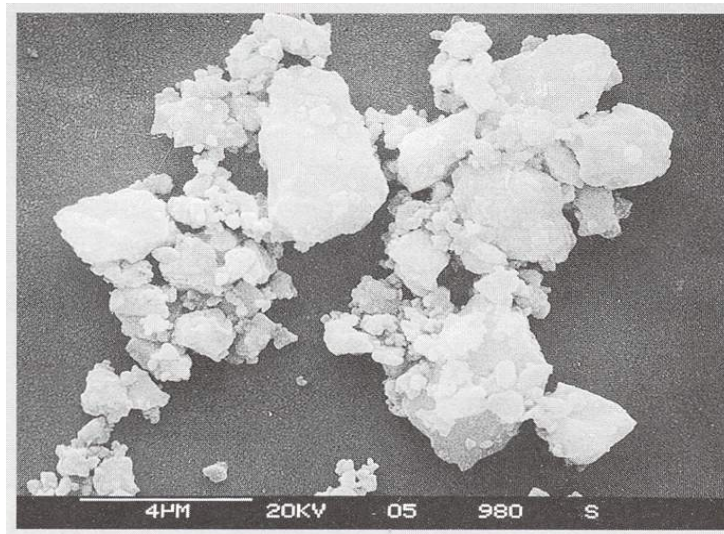
Tärkeimmät kalsiumkarbonaatin mineraalit ovat kalsiitti, aragoniitti ja vateriitti. Kalsiittia saadaan esim. kalkkikivestä. Aragoniitti on harvinaisempi kuin kalsiitti ja vateriittia löydetään harvoin luonnosta sen heikon pysyvyyden vuoksi./42/

Kalsiitin kidemuotoja on kolme. Kuution muotoinen romboedri, pylväsmäinen skalenoedri ja tynnyrin muotoinen prismaattinen rakenne. Kalsiitin tiheys on $2,72 \text{ kg/m}^3$ ja kovuus 3 MOH asteikolla. Aragoniitin kidemuoto on ortorombinen. Kalsiumkarbonaattia tuotetaan partikkelikokojakaumaltaan 40-98 % $<2 \text{ }\mu\text{m}$ ja vaaleudeltaan 80-95 % (Tappi T452)./42/

GCC-lyhennettä käytetään yleisesti liidusta, kalkkikivestä ja marmorista jauhetulle kalsiumkarbonaatille. Kuvissa 52 ja 53 on mikroskooppikuvat luonnon liidusta ja kalkkikivestä jauhetusta kalsiumkarbonaatista./42/



Kuva 52. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva (SEM) luonnon liidusta. Liidun nanofossiilinen rakenne on selvästi nähtävillä./42/

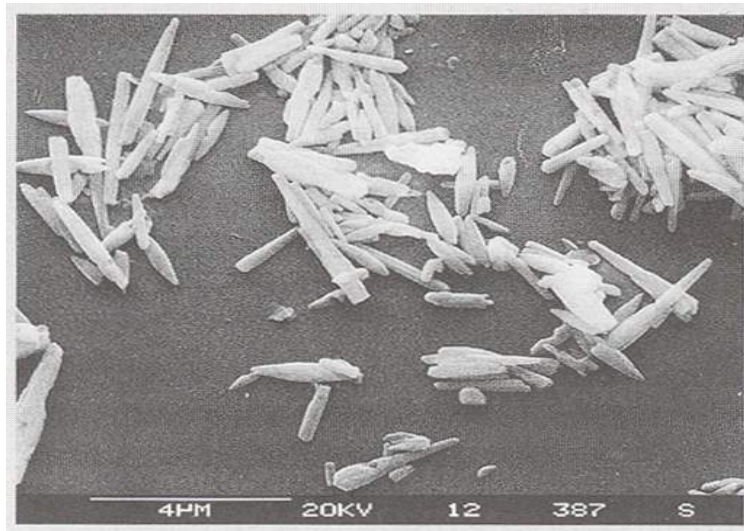


Kuva 53. SEM-kuva kalkkikivestä jauhetusta kalsiumkarbonaatista./42/

Saostettu kalsiumkarbonaatti on täysin synteettinen tuote. PCC:tä käytetään eniten Pohjois-Amerikassa, koska siellä ei esiinny luonnon kalsiumkarbonaattia. PCC:n ominaisuudet eroavat melkoisesti luonnon kalsiumkarbonaatista ja PCC:tä käytetäänkin usein paperin laadun parantamiseen räätälöimällä PCC:lle halutut mineraaliominaisuudet (kideyypä, koko, muoto)./42/

PCC:n raaka-aine on murskattu kalkkikivi. Kalkkikiveä poltetaan (kalsinoidaan) noin 1000 °C:n lämpötilassa, jolloin muodostuu kalsiumoksidia (CaO, poltetu kalkki). Poltetu kalkki lietetään veteen (kalkin sammutus), jolloin muodostuu kalsiumhydroksidia (Ca(OH)₂). Kalsiumhydroksidilietteeseen johdetaan hiilidioksidia tarkoin kontrolloiduissa olosuhteissa. Lietteestä saostuu kalsiumkarbonaattia./42/

PCC:n kidemuodot aragoniitti ja kalsiitti riippuvat valmistusolosuhteista. Aragoniitti on tyypillisesti neulamaista muodoltaan, kun taas kalsiittikiteet ovat skalenodrisiä tai romboedrisiä./42/



Kuva 54. SEM-kuva PCC aragoniittikiteistä./42/

5.2.2 Kaoliini

Kaoliini (engl. clay) on luonnon mineraali. Geologisesti se on alkalisen alumiinisilikaatin hajoamistuote. Suurimmat esiintymät sijaitsevat Englannin Cornwallissa, Keski-Euroopassa, Brasiliassa ja Yhdysvalloissa. Eurooppalainen kaoliini on ns. primääristä kaoliinia, kun taas amerikkalainen kaoliini on sekundaarista. Sekundaarinen kaoliini on kulkeutunut alkuperäisestä muodostumispaikastaan vesivirtojen mukana toiseen paikkaan. Primäärinen ja sekundaarinen kaoliini eroavat toisistaan koostumukseltaan, partikkelikooltaan ja -muodoltaan. Sekundaarinen kaoliini on tyypillisesti vähemmän levymäinen ja hienojakoisempi. Primäärisen ja sekundaarisen kaoliinin keskimääräiset kemialliset koostumukset on lueteltu taulukossa II. /42/

Taulukko II Primäärisen (Cornish) ja sekundaarisen (Georgian) kaoliinin keskimääräiset kemialliset koostumukset ja hehkutuksessa poistuvan materiaalin määrä./42/

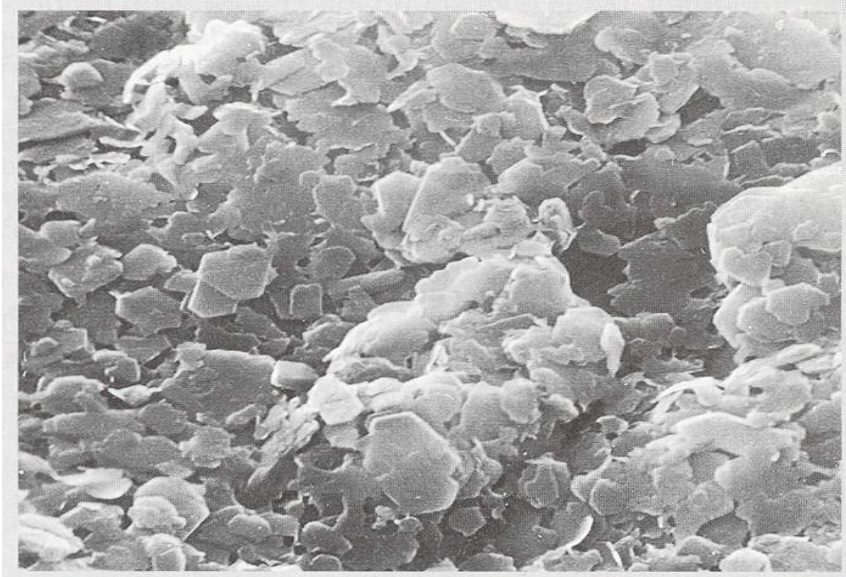
Chemical composition	Percentage in	
	Cornish clay	Georgian clay
SiO ₂	47.4	46.0
Al ₂ O ₃	37.3	38.0
Fe ₂ O ₃	0.98	0.86
TiO ₂	0.06	1.5
K ₂ O	1.84	0.4
Loss on ignition	12	13.5

Kaoliinin päämineraali on kaoliniitti. Nimi kaoliini tulee kiinalaisesta sanasta kauling, joka tarkoittaa korkeaa harjannetta. Kauling on paikka Jauchau Fussa, Kiinassa, missä kaoliini savea on kaivettu satoja vuosia. Kaoliniitti on kiderakenteeltaan kuusikulmainen, levymäinen kidevedellinen alumiinisilikaatti. Kaoliniitti on rakenteeltaan kaksikerroksinen. Toinen kerros on muodostunut tetraedrin mallisista silikaattimolekyyleistä ja toinen happiatomien yhdistämistä oktaedrin muotoisista alumiinimolekyyleistä. Vetysidokset pitävät kerroksia yhdessä. Kaoliniitin rakenne ei ole aina näin ideaalinen. Joissakin kohdin rauta-atomi tai jokin muu metalli saattaa korvata alumiinin./42/

Kaoliniittilevyn pinta on negatiivisesti ja reunat positiivisesti varautuneet. Varauksen voimakkuus on riippuvainen liuoksen pH:sta. Vesiliuoksessa nämä varaukset vetävät toisiaan puoleensa, jolloin muodostuu kottitalon tyyppisiä kaoliiniflokkeja. Kaoliinin lieton apuna käytetään anionista dispergointiainetta hajottamaan kaoliiniflokkeja./42/

Kaoliinipartikkelit koostuvat kuusikulmaisten levyjen kasoista (kuva 55). Kaoliinin jauhatuksessa sen muotokerroin (leveyden suhde korkeuteen) pysyy lähes muuttumattomana. Delaminointi prosessilla pyritään hajottamaan kaoliinilevyjen muodostamat kasat ja näin korottamaan kaoliinin muotokerrointa. Amerikkalaisen

kaoliinin muotokerrointa pyritään yleensä korottamaan sen luonnollisesta 7:1:stä 20-25:1:een./42/



Kuva 55. SEM-kuva kaoliinipartikkeleista./42/

Kaoliini on hyvä yleistäyteaine erilaisille paperilaaduille. Sitä on saatavilla monella eri partikkelikoollla ja vaaleusasteella. Päälystykseen tarkoitetut kaoliinit ovat hienojakoisempia ja vaaleampia (80-90 % <math><2\ \mu\text{m}</math>, 85-90 % ISO) kuin täyteainelaadut (30-70% <math><2\ \mu\text{m}</math>, 80-85 % ISO). Tavanomaisten kaoliinien lisäksi markkinoilla on myös erikoiskaoliineja, kuten bentoniittia ja kalsinoitua kaoliinia./42/

5.2.3 Muita täyte- ja päällystyspigmenttejä

Kalsiumkarbonaatti ja kaoliini hallitsevat täyteaine- ja päällystyspigmenttimarkkinoita yhteensä 85-95 % prosenttien osuudellaan. Muiden pigmenttien yhteisousuus on kasvanut viime vuosina, mutta niitä käytetään vasta noin 10 % kokonaismäärästä. Yleensä näillä erikoispigmenteillä pyritään saamaan paperiin ja kartonkiin jokin erityinen ominaisuus, kuten korkea taitekerroin tai vaaleus. Erikoispigmentit ovat usein kalliimpia kuin kuitumateriaali, joten niitä käytetään lähinnä päällystyksessä pieniä määriä kerrallaan./43/

Talkki on verrattain yleinen silikaattimineraali, joskin korkean talkkipitoisuuden esiintymät harvinaisia. Talkkia tuottavia maita ovat mm. Yhdysvallat, Ranska ja Suomi. Suomessa talkkia saadaan steaattista eli talkkiliuskeesta, jonka talkkipitoisuus on n. 55-60 %. Kemiallisesti talkki on kidevedellinen magnesiumsilikaatti, jolla on lamellimainen rakenne. Rakenne on kolmikerroksinen, jossa on magnesiumoksidikerros kahden hydrofobisen silikaattikerroksen välissä. Talkkikiteet pysyvät yhdessä heikoilla van der Waalsin voimilla ja delaminoituvat helposti. Siksi talkki on varsin pehmeää ja hydrofobinen pinnaltaan. Vain kiteen reunat ovat hydrofiiliset luonteeltaan heikon kationisen varauksensa vuoksi. Pehmeys ja hydrofobinen luonne antavat talkille tietyt erityisominaisuudet. Hienoksi jauhettua talkkia käytetään paperin ja paperimassan valmistuksessa pihkan absorbointiin. Talkin lietto on hieman ongelmallista sen hydrofobisen luonteen vuoksi ja tarvitseekin tensidejä liettyäkseen. Talkki sitoo myös helposti ilmaa itseensä ja saattaa siten aiheuttaa paperinvalmistuksessa vaahtoamisongelman. Talkin pehmeydellä ja korkealla muotokertoimella on positiivinen vaikutus paperin pintaominaisuuksiin./42/

Titaanidioksidi (TiO_2) on synteettinen pigmentti, jolla on korkeat optiset ominaisuudet. Vaikkakin titaani on melko yleinen alkuaine, sitä ei yleensä löydy suuren konsentraation esiintymänä. Paperinvalmistuksessa käytetään kahta TiO_2 laatua, rutiilia ja anataasia. Rutiilikide on stabiilimpi ja kompaktimpi, mutta tyypillisesti molemmilla on korkea tiheys ja taitekerroin. Korkea taitekerroin yhdessä optimaalisen partikkelikoon kanssa antavat titaanidioksidille ylivoimaiset valonsirontaominaisuudet. Korkean taitekertoimen omaavaa titaanidioksidia käytetään paperilaaduissa, joissa tarvitaan suurta opasiteettia kun paperi on märkä. Titaanidioksidin haittapuolia on sen korkea hinta ja tiheys sekä pienestä partikkelikoosta johtuva huono retentio paperikoneen mässässä päässä./42/

Alumiinihydroksidi on synteettinen mineraali, jota valmistetaan bauksiitista ja natriumhydroksidista. Alumiinihydroksidia käytetään sekä täyteaineena, että päällystyspigmenttinä lisäämään vaaleutta, kiiltoa, sileyttä ja painettavuutta. Alumiinihydroksidin vaaleus on erittäin korkea ja partikkelikoko pieni levymäinen.

Levyväinen rakenne ei kuitenkaan muodosta aggregaatteja kuten talkilla ja kaoliinilla. Alumiinihydroksidia käytetään monesti yhdessä titaanidioksidin kanssa./42/

6 PAPERIN JA KARTONGIN TÄYTTÖ

6.1 Täyteaineiden vaikutus paperin ja kartongin ominaisuuksiin

Täyteaineilla on sekä positiivisia, että negatiivisia vaikutuksia paperin ominaisuuksiin. Kuituja suurempi kovuus ja tiheys sekä paremmat optiset ominaisuudet vaikuttavat paperin ominaisuuksiin. Myös täyteaineiden pintaominaisuuksilla on vaikutuksia paperin ominaisuuksiin./42/

Täyteaineiden perinteinen tarkoitus on aina ollut paperin optisten ominaisuuksien parantaminen. Tämä on mahdollista, sillä täyteaineilla on korkeampi vaaleus ja valonsirontakerroin kuin kuitumateriaalilla. Tosin tänä päivänä joillakin kemiallisilla massoilla vaaleustaso saattaa olla jo samaa luokkaa kuin mineraaleilla. Myös mekaanisten massojen valonsirontakyky saattaa olla samaa luokkaa kuin täyteaineilla. Niinpä usein tarvitaankin erikoispigmenttejä paperin optisten ominaisuuksien parantamiseen. Tavanomaisia pigmenttejä tarvitaan kuitenkin edelleen esim. superkalanteroitujen laatuojen kiillon parantamiseen sekä mekaanisesta massasta valmistetun paperin kellastumisen vähentämiseen./42/

Paperin pinnan ominaisuudet ovat erittäin tärkeitä paino- ja päällystysprosesseissa. Yleisesti ottaen täyteaineet parantavat paperin sileyttä erityisesti kalanteroiduilla laaduilla. Painossa veden ja painomusteen absorptio paperin pintaan on tasaisempi täyteaineiden läsnä ollessa. Paperin huokoisuuteen vaikuttavat täyteaineen partikkelikoko ja muoto. Karkeammat täyteaineet lisäävät paperin huokoisuutta ja levymäiset pienentävät sitä./42/

Paperin bulkki yleensä alenee täyteaineen määrän lisääntyessä samalla neliömassalla, koska täyteaineiden tiheys on suurempi kuin kuitujen. Paperin lujuus perustuu lähinnä kuitujen keskenään muodostamien sidosten lujuuteen. Niinpä paperin lujuus heikkenee täyteainelisäyksen myötä, sillä täyteainepartikkelit eivät kykene muodostamaan

vahvoja sidoksia kuituihin tai toisiin täyteainepartikkeleihin. Lujuus heikkenee myös koska kuitusidoksia muodostuu vähemmän pinta-alayksikköä kohti täyteainepartikkeleiden viedessä niiltä tilaa. Täyteainepitoisuuden kasvaessa kuituja täytyy jauhaa enemmän lujuuden lisäämiseksi. Lujuutta voidaan lisätä myös massaliimauksella./42/

6.2 Täyteaineiden vaikutus paperin ja kartongin valmistusprosessiin

Vaikka täyteaineet ovat lähes inerttejä, niillä on vaikutus prosessin vesiin. Täyteaineet voivat liueta jonkin verran muuttaen prosessiveden pH:ta ja epäorgaanisten ionien määrää. Seurauksena voi olla vaahtoamiongelmia tai saostumia. Esimerkiksi talkki usein lisää vaahtoamisriskiä, mutta toisaalta sitoo oleofiilisiä aineita itseensä ja ne poistuvat prosessivesistä paperin tai puhdistuksen mukana./42/

Täyteaineita voi olla jopa puolet paperikoneen perälaatikkomassan kuivapainosta. Niiden sitominen syntyvään paperirainaan on yksi paperinvalmistuksen tärkeimmistä tehtävistä. Täyteaineet voidaan sitoa kuituihin mekaanisesti tai kemiallisesti. Tavoitteena on tietenkin niin hyvä retentio kuin mahdollista, mutta prosessiolosuhteet on myös otettava huomioon. Esimerkiksi liian voimakas flokkulointi johtaa paperin formaation epätasaisuuteen. Huono retentio puolestaan tarkoittaa tehotonta täyteaineiden käyttöä ja niiden kertymistä prosessivesiin./42/

Täyteaineiden käyttö parantaa vedenpoistoa paperikoneen viiralla ja puristinosalla vähentäen kuivatusosalla tarvittavan energian kulutusta./42/

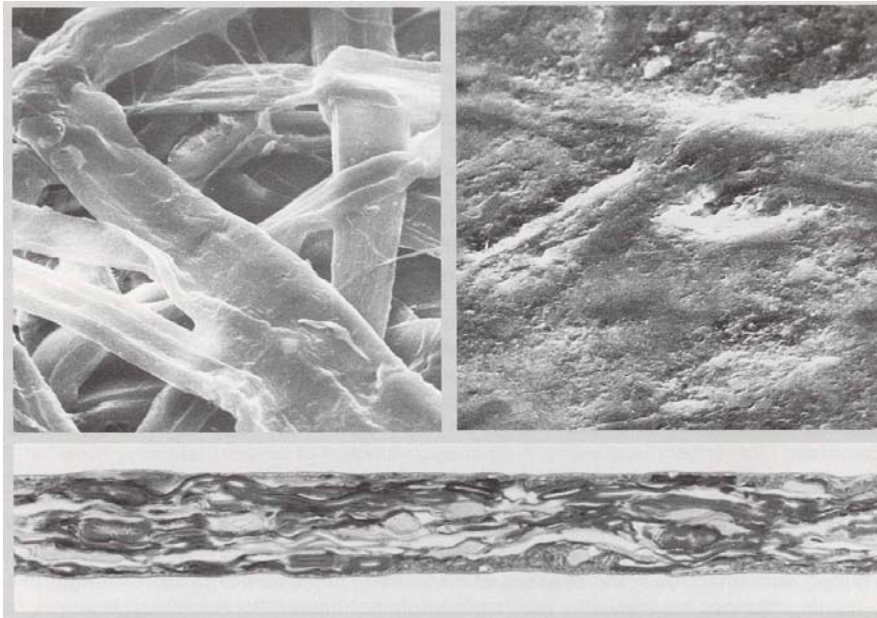
Täyteaineiden käyttö lisää paperikoneen osien kulumista. Viira ja viirapöydän osat ovat näistä osista tärkeimmät. Huono retentio lisää kulumista, koska täyteainepartikkelit jäävät viiran ja vedenpoistofoilien väliin. Täyteaineiden on tärkeä olla puhtaita ja pienikokoisia. Kovat epäpuhtaudet lisäävät kulumista. Täyteaineiden MOH-kovuuksilla on todettu olevan vain vähäinen merkitys kulumiseen kunhan täyteaineet vain ovat puhtaita./42/

7 PAPERIN JA KARTONGIN PÄÄLLYSTYS

7.1 Päällistyksen tarkoitus

Päällistyksellä voidaan tarkoittaa monenlaista paperin ja kartongin pinnan peittämistä. Esimerkiksi paperia kartonkia voidaan päällystää muovilla, erilaisilla polymeeridispersioilla, foliolla tai vahalla. Kun seuraavissa kappaleissa puhutaan päällistyksestä sillä tarkoitetaan vesipohjaista pigmenttipäällistystä./44/

Pigmenttipäällistyksessä pohjamateriaalin pintaan levitetään pigmenttiä, jonka hiukkaset sidotaan toisiinsa ja pohjaan sopivalla sideaineella. Tavoitteena on tavallisesti sekä tuotteen ulkonäön että erityisesti painettavuuden parantaminen. Pigmenttipäällistystä tehdään ennen kaikkea painopapereille, tapettipapereille ja –kartongeille sekä rasiakartongeille. Päällistyskerros antaa tuotteelle useita painoalustalle tärkeitä ominaisuuksia. Paperin pintarakenteen tasaisuus ja sileys paranevat (kuva 56), painoväriin absorptiota voidaan hallitusti säädellä ja paperin optiset ominaisuudet paranevat. Lisäksi päällistys parantaa paperin ajettavuutta painokoneella./44,45/



Kuva 56. SEM-kuva päällistämättömän ja päällistetyin paperin pinnasta sekä poikkileikkauksena päällistetyistä paperista./44/

Päällystyksessä paperin pintaan, yhdelle tai molemmille puolille, levitetään vesiliukoista päällystypastaa. Levityksen jälkeen pasta kuivataan ja viimeistellään. Viimeistelyssä päällystys saavuttaa täyden säilytensä ja kiiltonsa./44/

7.2 Päällystypastan komponentit

Pigmenttipäällystysseos koostuu pigmentistä (yksi tai useampia), sideaineesta, vedestä ja lisäaineista. Päällystypastan komponenttien keskinäinen suhde vaihtelee melko paljon lopputuotteesta ja päällystysmenetelmästä johtuen. Pigmenttipäällystyksessä pigmentin osuus ja merkitys on kuitenkin määräävä./45/

Päällystypastan on tärkein ja päällystytuloksen kannalta oleellisin komponentti on pigmentti. Sen osuus seoksen kuiva-aineesta on yleensä 75-95 %. Päällystyspigmentiltä vaaditaan seuraavia ominaisuuksia:

- sopiva hiukkaskoko ja -muoto
- alhainen tiheys
- suuri vaaleus ja taitekerroin
- kemiallisesti stabiili ja inertti
- helppo liettää mahdollisimman pieneen vesimäärään
- sekoitettavuus muiden pigmenttien ja sideaineiden kanssa
- vähäinen sideaineen tarve
- pieni kuluttavuus
- huokea hinta ja riittävä saatavuus./45/

Päällystys pigmentit ovat usein samoja mineraaleja kuin paperin täytössä käytetyt. Päällystys asettaa niille kuitenkin suuremmat laatuvaatimukset. Päällystyksessä käytettäviä mineraaleja on lueteltu kappaleessa 5.2./45/

Sideaineen tehtävänä on sitoa pigmenttihiukkaset toisiinsa ja pohjapaperiin. Käytettävät sideainemäärät vaihtelevat sideaineesta ja sovelluksesta riippuen tavallisesti 5-25 % pigmentin määrästä laskettuna. Sideaineella on merkittäviä vaikutuksia päällystypastaan ja päällysteen ominaisuuksiin. Toivottavia sideaineen ominaisuuksia ovat:

- suuri sitomiskyky
- värittömyys tai korkea vaaleus
- hyvä kalvonmuodostuskyky
- hyvä vedenpidätyskyky
- sekoitettavuus eri pigmenttien kanssa
- hyvä reologia ja stabiilisuus

Eri paperilajeja valmistettaessa nämä vaatimukset painottuvat eri tavalla. Sideaineet poikkeavat mainittujen ominaisuuksien puolesta toisistaan. Usein ei yksi sideaine täytä kaikkia vaatimuksia riittävästi, vaan päällystysseoksissa käytetään yleisesti kahta tai jopa useampaa sideainetta samanaikaisesti. Sideaineet voidaan jakaa kahteen pääryhmään. Liukoisia sideaineita ovat mm. tärkkelys, karboksimeetyyliselluloosa (CMC), proteiinit ja polyvinyylialkoholi (PVA). Polymeeridispersioihin kuuluvat lateksit (mm. SB ja PVAc)./44,45/

Päällystysseoksiin lisätään usein pieniä määriä erilaisia lisäaineita parantamaan päällystysseoksen käyttöominaisuuksia tai antamaan päällysteelle tiettyjä erityisominaisuuksia. Näitä voivat olla:

- päällystysseoksen virtausominaisuuksia muuttavat aineet
- vaahdonesto- ja vaahdonpoistoaineet
- säilöntäaineet
- voiteluaineet
- kovettimet
- optiset kirkasteet
- dispergointiaineet./45/

8 PAPERIN JA KARTONGIN POLTTO

Koska paperin ja kartongin laserleikkaus on luonteeltaan terminen, on syytä selvittää hieman mitä tapahtuu kun paperia ja kartonkia poltetaan ja mitä siitä syntyy. Lasersäteen polttopisteen tehotiheys voi olla jopa miljardikertainen tavalliseen keltaista

valoa säteilevään liekkiin verrattuna. Ja kun kuitumateriaali absorboi esim. hiilidioksidilaserin säteilyä niin hyvin että se haihtuu, voitaneen olettaa että polttopisteessä materiaalin laskennallinen lämpötila voi olla hyvinkin paljon korkeammalla kuin normaalissa poltossa. Lisäksi laserleikkauksessa materiaali ei välttämättä yhdy happeen vaan höyrystyy hapettumatta. Näistä syistä johtuen kemialliset reaktiot ja niissä syntyvät tuotteet eivät välttämättä ole samoja, kun paperia tai kartonkia pidetään laserin polttopisteessä tai vaikkapa kynttilän liekissä.

8.1 Joidenkin paperin ja kartongin valmistuksessa käytettävien materiaalien reaktioita korkeissa lämpötiloissa

8.1.1 Paperin ja kartongin syttymislämpötila

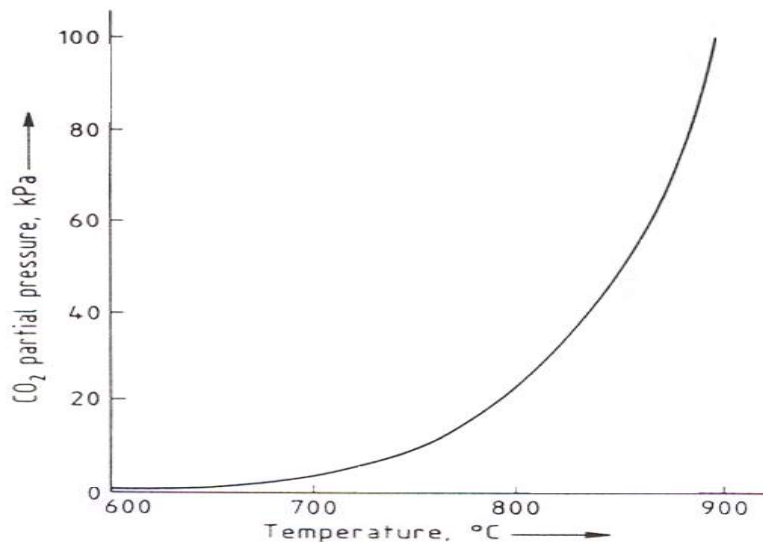
Syttymislämpötiloja tarkasteltaessa on syytä määritellä kaksi termiä, joita kumpaakin voidaan pitää palamislämpötilana. Syttymislämpötila on matalin lämpötila, jossa ilmassa lämmitetty materiaali syttyy hapettumisen aiheuttamasta lämmöstä ilman ulkoista sytytysenergiaa. Leimahduspiste on alin lämpötila, jossa ilmassa lämmitetyn materiaalin erittämä herkästi syttyvä kaasu leimahtaa ulkoisen sytytysenergian vaikutuksesta silloin kun kaasun tiheys on saavuttanut palamisrajan. Bøhmerin /46/ mukaan paperin syttymislämpötila on noin 450 °C ja leimahduspiste 350 °C. Paperin ja kartongin syttymislämpötila riippuu kuitenkin jonkin verran niiden laadusta. Lisäksi Bøhmerin ilmoittama leimahduspiste on johdettu raion- ja puuvillakuitujen leimahduspisteistä. Ramsay ja Richardson /25/ sekä Ainsworth /22/ arvioivat laserleikkauksessa polttopisteen lämpötilan olevan 1600-2000 °C, joten laserleikkauksessa lämpötilat ovat reilusti paperin syttymislämpötilan yläpuolella./22,25,46/

8.1.2 Kalsiumkarbonaatin reaktiot

Paperin ja kartongin täyteaineena ja päällystyspigmenttinä käytettävä kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi lämmitettäessä yli 600 °C lämpötilassa kaavan 3 mukaisesti./47/



Hajoamiseen tarvittava energia on 900 °C:n lämpötilassa 3010 kJ/kg. Vaikka kalsiumkarbonaattikappaleen pinnan hajoaminen alkaa jo 600 °C:n lämpötilassa, täydellinen kalsinoituminen tapahtuu vasta yli 900 °C:n lämpötiloissa (kuva 57)./47/



Kuva 57. Hiilidioksidin osapaineen muuttuminen lämpötilan funktiona kalsiumkarbonaatin yläpuolella./47/

Kalsinoitumismekanismi on monimutkainen ja siinä on useita vaiheita. Kalsiumkarbonaatin kalsinoitumisen aste riippuu mm. partikkelikoosta, lämpötilasta, reaktiokaasuista sekä jo tapahtuneet kalsinoitumisen määrästä./47/

Hu ja Scaroni /48/ kehittivät laserkuumennustekniikan tutkiakseen kalsiumpohjaisten materiaalien hajoamista korkeissa lämpötiloissa (600-1600 °C), lyhyillä viipymäajoilla (5-120 ms). Tutkimuksessa he käyttivät Coherent Generalin valmistamaa 1700 W:n Everlase S51 hiilidioksidilaseria. Hun ja Scaronin mukaan korkeissa lämpötiloissa lyhyillä viipymäajoilla partikkelin koko vaikuttaa sen kalsinoitumisnopeuteen. Suurten partikkelien lämpiäminen ja siten myös kalsinoituminen kestää kauemmin kuin pienempien, koska lämpö siirtyy partikkeliin pääasiassa johtumalla./48/

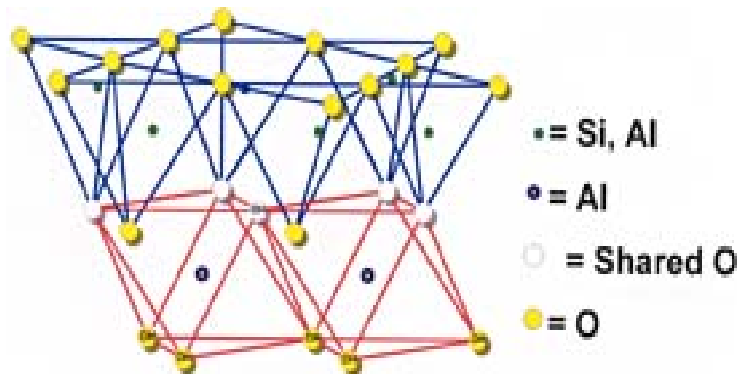
Partikkelien fragmentoitumisnopeuteen vaikuttivat partikkelin koko, lämpötila ja koostumus (kalsiumkarbonaatti sisältää epäpuhtauksina mm. $MgCO_3$, SiO_3 ja Al_2O_3). Karbonaatin koostumus vaikutti eniten sen fragmentoitumisnopeuteen./48/

8.1.3 Kaoliinin reaktiot

Kaoliinimineraalit ovat kidevedellisiä alumiinisilikaatteja, joiden rakennekaava keskimäärin kaavan 6 mukainen./49/



Kaoliiniitti on yleisin kaoliinimineraalin rakenne (kuva 58). Kaoliiniitti koostuu yhdestä silikaattitetraedrikerroksesta ja yhdestä alumiinioktaedrikerroksesta. Kaoliiniyksikkö muodostuu näiden kahden kerroksen yhteenliittymästä. Lisäksi näitä silikaatti-alumiinikerroksia on kasautunut päällekkäin. Kaoliinien hieman erilainen kiderakenne johtuu näiden kerrosten erilaisista asemista toisiinsa nähden./47,49/



Kuva 58. Kaoliiniittimineraalin rakenne./49/

Paperin ja kartongin päällystyksessä käytettävä kaoliini voi olla joko kidevedellistä tai kalsinoitua. Kidevedellinen kaoliini on modifioimatonta, eli siinä on hydrofiilisiä hydroksyyliyhmiä. Kidevedellinen kaoliini voidaan delaminoida. Delaminoinnissa kaoliinilevyjen muodostamat kasat hajotetaan siten, että kaoliinikidekasojen korkeus pienenee. Kalsinoitua kaoliinia valmistetaan lämpökäsittelmällä pestyä ja valkaistua kaoliinia. Matalan lämpötilan kalsinointi tapahtuu noin 650-700 °C:ssa. Tällöin syntyy amorphista metakaoliinia, kun kaoliinista poistuu kidevettä. Kaoliinin tiheys putoaa $2,58 \text{ kg/m}^3$:sta $2,50 \text{ kg/m}^3$:ssa. Samalla kovuus ja huokoisuus, ja siten myös vaaleus ja

opasiteetti kasvavat. Täysin kalsinoitua kaoliinia saadaan 1000-1150 °C:n lämpötilassa. Tässä lämpötilassa kaoliinin amorphinen rakenne sortuu täysin ja tiheys kasvaa 2,6:sta 2,7:ään. Kaoliinin sulamislämpötila on noin 1850 °C. Ainsworth /22/ arvioi kaoliinilla päällystetyn paperin laserleikkauskokeissaan polttopisteen lämpötilaksi 1600 °C, koska leikkausurasta kerättyjen partikkelien muoto oli lähes täydellisen pyöreä./22,49/

8.2 Paperin poltossa syntyvät päästöt

Paperin poltossa syntyvät päästöt ovat peräisin joko suoraan paperipolttoaineesta tai sitten jokin paperin ainesosa muuttuu polton yhteydessä haitalliseksi päästökseksi. Palamislämpötila vaikuttaa eri haitallisten aineiden muodostumiseen. Kriittisiä alueita ovat lämpötilan lasku- ja nousuvaiheet eli noin 400-500 °C. Tällöin muodostuu helposti mm. häkää, metaania ja eri hiilivety-yhdisteitä. Muodostumisen määrän ratkaisee viipymäaika ja kaasujen sekoittuminen ko. lämpötila-alueella. Paras palamislämpötila-alue olisi 900-1100 °C./50/

Selluloosassa tiedetään tapahtuvan monia erilaisia lämmöstä johtuvia hajoamisreaktioita eri lämpötiloissa. Matalissa lämpötiloissa reaktiot liittyvät selluloosan ikääntymisreaktioihin kosteuden, hapen ja valon vaikutuksesta. Yli 200 °C:n lämpötiloissa selluloosa menettää ensin siihen absorboituneen veden hieman korkeammissa lämpötiloissa selluloosa alkaa pilkkoutua hydroksyyliyhdisteiden β -eliminointia kautta. Edelleen korkeammissa, yli 250 °C:n, lämpötiloissa alkavat vaikuttaa useat kilpailevat pyrolyyttiset reaktiot. Nämä reaktiot voidaan jakaa kolmeen perusr ryhmään:

- Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat alhaisissa lämpötiloissa tapahtuvat ikääntymisen kaltaiset reaktiot, joiden reaktiotuotteina ovat vesi, CO, CO₂ ja hiili.
- Korkeammilla lämpötiloilla selluloosaketju alkaa pilkkoutua muodostaen reaktiotuotteina anhydroglukoosijohdannaisia, syttyviä orgaanisia materiaaleja ja tervaa
- Vieläkin korkeammissa lämpötiloissa selluloosaketjut katkeilevat enemmän tai vähemmän sattumanvaraisesti muodostaen erilaisia pienen molekyylipainon yhdisteitä./51/

Happamuutta aiheuttavat päästöt ovat paperin poltossa pienemmät kuin kivihiilen, öljyn ja puun poltossa. Paperi saattaa sisältää pieniä määriä kloorattuja dioksiineja ja furaaneja, jotka kuitenkin tehokkaalla polttotekniikalla palavat. Myös savukaasujen raskasmetallipitoisuudet on todettu pieniksi (taulukko III)./50,52/

Taulukko III Emissiot eri polttoaineille ennen savukaasun puhdistusta Berliinin teknillisen korkeakoulun polttokokeissa. Tähdellä merkityt suureet on redusoitu 12 % CO₂-pitoisuuteen kuivissa kaasuissa./50/

Parametri	Sanomalehdet	Pahvit	Kartongit	Etiketit	Al-PE-kartongit	Mäntylastut
Hiukkaset, mg/m ³ *)	337	83	459	1210	209	287
HCl, mg/m ³ *)	12	114	173	8755	66	37
Fluorivety, mg/m ³ *)	1,8	2,8	0,53	15,7	1,04	0,7
SO ₂ , mg/m ³ *)	607	377	1321	1045	553	358
CO, mg/m ³	7333	1234	4012	7025	1224	4313
NO, mg/m ³	605	586	546	484	561	637
NO ₂ , mg/m ³	29	36	18	29	22	15
Kokonaishiilivedyt, ppm	1835	1100	411	994	79	137
TOC, mg/m ³	2949	1768	661	1597	127	220
CO ₂ , %	8,1	10,7	7,5	4,5	601	11,3
O ₂ , %	11,4	9,2	11,3	14,9	13,4	6,7

Orgaanisista yhdisteistä haitallisia ovat huonosti palavat yhdisteet, joista syntyy polyaromaattisia, usein mutageenisia PAH-yhdisteitä. Erityisen haitallinen epäpuhtaus on PVC-muovi, josta vapautuva kloori reagoi polton aikana muodostaen PCDD ja PCDF-yhdisteitä. Vaikka PAH-yhdisteitä on mukana kun kartonkia poltetaan tavanomaisin menetelmin, laserleikkauksen savukaasuissa niitä ei kuitenkaan esiinny. Väli tuotteet, jotka muuttavat alifaattiset hiilivedyt aromaattisiksi Diels-Alderin reaktioilla, hajoavat lasersäteen vaikutuksesta. Aromaattiset yhdisteet, jotka jo ovat paperissa, hajoavat myös. Lasertuhkaus onkin tehokkaampaa kuin perinteinen tuhkaus./25,51/

KOKEELLINEN OSA

9 TYÖN TAVOITTEET JA TARKOITUS

Tämän diplomityön tavoitteena oli kartoittaa eri päällystetyyppien vaikutus paperin ja kartongin laserleikattavuuteen. Lisäksi pyrittiin selvittämään eri laserparametrien ja päällysteen yhteisvaikutusta leikkaustapahtumaan, siinä syntyviin kaasuihin, leikkausjäljen laatuun ja prosessin hallittavuuteen.

Aiemmissa paperin ja kartongin laserleikkauksiin liittyneissä tutkimuksissa on havaittu päällysteen tai jonkin sen komponentin vaikeuttavan leikkausta. Hankaluudet ilmenivät esimerkiksi siten, että tietyn leikkausnopeuden saavuttamiseksi tarvittiin enemmän lasertehoa kuin mitä saman paksuisella päällystämättömällä materiaalilla. Lisäksi ongelmaksi voi muodostua leikkauksesta jäljelle jäävä pigmenttipöly sekä mahdolliset päällysteen laserleikkauksesta johtuvat haitalliset savukaasut.

10 KÄYTETYT MATERIAALIT JA MENETELMÄT

10.1 Käytetyt materiaalit

Diplomityön kokeissa leikattavaksi kartongiksi valittiin Stora Enson kartonkikone 1:llä Imatralla valmistettava Cupforma Classic kartonki. Cupforma Classic on koivusellupohjainen kuppikartonki. Näytteet päällystettiin pintapuoleltaan Stora Enson Imatran Tutkimuskeskuksen pilot-coaterilla. Päällystyksessä käytettiin kahta eri kalsiumkarbonaattipigmenttikokoa, yhdenlaista kaoliinia sekä kaoliinin ja kalsiumkarbonaatin 50:50 seosta. Kullakin päällystepigmenttityypillä Cupforma Classicia päällystettiin kahteen eri päällystemäärään, n. 20 g/m²:aan ja n. 6 g/m²:aan. Poikkeuksena tästä säännöstä on koepiste 102, joka on otettu referenssiksi aikaisemmista tutkimuksista /39/. Koepisteen 102 vastine näissä kokeissa on koepiste 108. Koepisteen 108 päällystyksessä käytetty karbonaatti oli hieman hienojakoisempaa kuin 102:ssa. Päällystyspastan sideaineena kartongeissa käytettiin PVA:ta ja styreeniakrylaattilateksia.

Näissä kokeissa leikatut paperit valmistettiin Stora Enson Oulun tehtailla. Paperit ovat CTMP-pohjaista päällystettyä hienopaperia, jossa on täyteaineena kalsiumkarbonaattia 15-18 %. Toinen näytteistä päällystettiin molemmin puolin käyttäen pigmenttinä kalsiumkarbonaattia.

Kartonkinäytteet stansattiin Stora Enson painotalossa ympyröiksi, joiden halkaisija oli 200 mm. Samalla kartonkikiekon keskelle stansattiin 20 mm reikä, josta arkki voitiin kiinnittää laserleikkausaseman levypyörittimeen. Paperinäytteet leikattiin Stora Enson Oulun tehtaalla n. 100 mm leveiksi ja 1100 mm pitkiksi suikaleiksi rumpuasemalla leikkaamista varten. Kaikki näytteet ilmastoitiin 50 % RH kosteudessa ja 23 °C lämpötilassa.

Kokeissa käytettyjen materiaalien tarkemmat tiedot on luetteloitu taulukkoon IV. Jatkossa käsitellään näitä materiaaleja enimmäkseen koepistenumeroitensa mukaan.

Taulukko IV Kokeissa käytetyt materiaalit ja niiden koepistenumerointi.

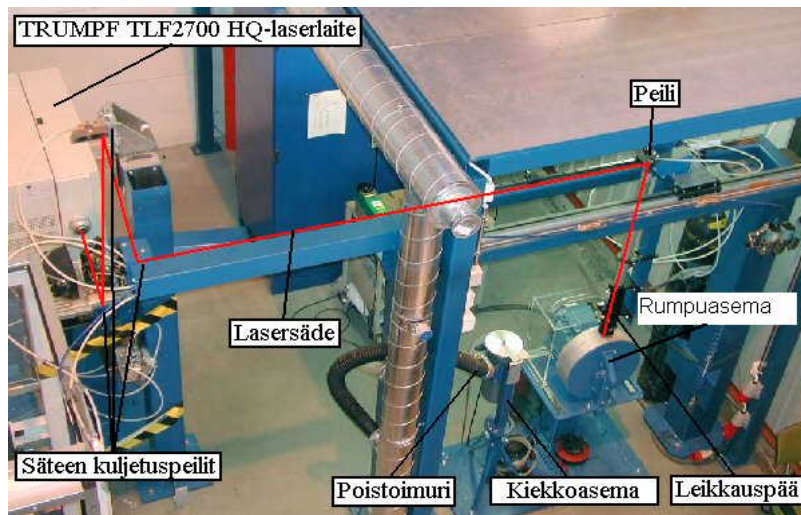
Koepiste	Pohjamater.	Neliömassa, g/m ²	Paksuus, µm	Pääl. pigmentti	Täyteaine	Pääl.määrä, g/m ²
31	Cupforma Classic	250	330	-	-	-
102	Cupforma Classic	270	319	CaCO ₃ , HC60	-	17,4
108	Cupforma Classic	270	319	CaCO ₃ , CC75	-	20,3
111	Cupforma Classic	255	314	CaCO ₃ , CC75	-	6,0
114	Cupforma Classic	265	316	Kaoliini, Premium	-	15,6
117	Cupforma Classic	257	316	Kaoliini, Premium	-	6,8
120	Cupforma Classic	271	322	Kaoliini/CaCO ₃	-	22,1
123	Cupforma Classic	256	314	Kaoliini/CaCO ₃	-	6,8
63	CWF	70	100	-	CaCO ₃	-
64	CWF	70	107	CaCO ₃	CaCO ₃	50,0

10.2 Koelaitteisto

Työssä tehdyt laserleikkauskokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston lasertekniikan laboratorioissa Tulevaisuuden Tehtaalla. Leikkauksissa käytettiin Trumpf:n 2,7 kW:n TLF2700 hiilidioksidilaseria. Laser on tyypiltään nopean aksiaalivirtauksen laser. Laserista ulos tuleva TEM₀₀-moodin tasopolarisoitunut säde voitiin tuottaa sekä pulssitettuna että jatkuvana. Pulssitetun säteen taajuutta voitiin säätää välillä 0,1-100 kHz. Käytännössä kuitenkin pulssin taajuus pidettiin aina

leikattaessa taajuudessa 99,999 kHz. Sädetä voitiin pitää päällä 10 ms:sta ylöspäin lähes rajattomasti.

Laserin ja työasemien sijoittelu sekä säteen kuljetus on esitettyä kuvassa 59.



Kuva 59. Työssä käytetty Trumpf TLF2700 CO₂-laser, säteenkuljetusjärjestelmä, kiekko-työasema ja rumpu-työasema./39/

Säde siirrettiin laserilta työasemalle neljän kuparipeilin avulla. Säteenkuljetusoptiikan aiheuttama tehonhäviö oli noin 24 %, jolloin työkappaleella säteen teho oli maksimissaan n. 2150 W. Viimeinen peili oli liikuteltavissa yhdessä leikkaussuuttimen kanssa, jolloin säde voitiin ohjata kahdelle eri työasemalle. Rumpu-työasemalla voitiin saavuttaa 3 – 1200 m/min leikkausnopeus. Rumpu-työasemalla leikkausnopeuden maksimi oli 4000 m/min.

Lasermechin leikkauspäässä Ophirin 1,5 tuuman sinkkiselenidilinsillä lasersäde fokusoitiin 2,5 tuuman polttovälillä halkaisijaltaan noin 80 µm polttopisteeksi. Polttopisteen paikkaa voitiin säätää pystysuunnassa leikkauspäässä olleella mikrometrillä 50 mm:n matkalla. Vaakasuunnassa polttopisteen paikkaa voitiin säätää hieman linssiä liikuttamalla. Leikkauskaasuna käytettiin typpeä, joka johdettiin leikkauspäähän ja edelleen leikkaussuuttimesta ulos säteen suuntaisesti työkappaleelle 5 bar:n paineella. Leikkauskaasun painetta voitiin vaihdella välillä 0-15 bar. Laserparametrikokeissa leikkauskaasuna käytettiin typen lisäksi happea, argonia,

Taulukko VI Papereiden ja kartonkien pohjapuolelta tehdyt laserleikkaukset ja mittaukset.

Pohjapuolelta tehtävät leikkaukset ja mittaukset										
Koepiste	31	102	108	111	114	117	120	123	63	64
Päälysteen laatu	-	CaCO ₃	CaCO ₃	CaCO ₃	kaoliini	kaoliini	50:50	50:50	-	CaCO ₃
Pigmentin merkki	-	HC60	CC75	CC75	Premium	Premium	CC75+P	CC75+P	-	-
Mater. paks. um	330	321	319	314	316	316	322	314	100	107
Päälyste määrä, g/m ²	0	17,4	20,3	6,0	15,6	6,8	22,1	6,8	0	50
Focus/nopeus		x	x	x	x	x	x	x		
Teho/nopeus		x	x	x	x	x	x	x		
Mustuminen		x	x	x	x	x	x	x		
Focus suurella teholla		x	x							
Leikkauskaasun paine		x	x							
Kaasun laatu		x	x							
Sivupuhallus		x	x							
Suutin korkeus		x	x							
Suuttimen halkaisija		x	x							
Mittaukset										
Uraleveys		x	x	x	x	x	x	x		
Pölymäärä										
Savukaasut										

Taulukoissa V ja VI listatut kokeet sisältävät seuraavaa;

- Fokus/nopeus-kokeessa muutettiin lasersäteen polttopisteen paikkaa paperin tai kartongin pintaan nähden. Polttopisteen paikka asetettiin aluksi -0,8 mm näytteen pinnan (puoli, joka on sädetä kohti) alapuolelle ja tulokseksi kirjattiin maksiminopeus, jolla leikkaus meni täysin näytteen läpi. Laserteho tässä kokeessa pidettiin vakiona 18 %:ssa eli noin 280 W:ssa. Polttopisteen paikkaa vaihdettiin 0,2 mm:n välein aina asemaan +0,8 mm. Optimipolttopisteen paikaksi saatiin näin kohta, jossa oli suurin leikkausnopeus.
- Teho/nopeus-kokeessa lasersäteen tehoa nostettiin tasaisin välein pitäen polttopiste fokus/nopeus-testissä saadussa optimikohdassa. Kunkin teholumen kohdalla kirjattiin ylös maksiminopeus, jolla leikkaus meni täysin näytteen läpi.
- Mustumiskokeessa tehoa lisättiin tasaisin välein 9 %:sta 100 %iin pitäen leikkausnopeus vakiona. Vakio leikkausnopeus oli se nopeus, jolla leikkaus meni

täysin näytteen läpi teho/nopeus-kokeessa 9 %:n laserteholla. Tulokseksi saatiin leikkausuran reunojen mahdollinen värjäytyminen käytettäessä ylimäärin tehoa.

- Leikkauksissa muodostuvan paperinpölyn määrittämiseksi kutakin näytettä leikattiin 10 kiekkoa pintapuolelta. Syntyneitä pölyjä imettiin pumpulla suodattimeen, joka punnittiin.
- Leikkauksissa syntyvien kaasujen analysoimiseksi leikattiin yksi kiekko kutakin näytettä. Syntyneitä kaasuja imettiin ioninvaihtohartsia sisältäneen putken läpi. Hartsia analysoitiin Stora Enson Tutkimuskeskuksen massaspektrometrilla. Tällä menetelmällä päästiin hieman käsiksi leikkauksissa syntyvien kaasujen laatuun. Niiden määrää ei voitu näin määrittää.

Yllä luetellut peruskokeet tehtiin kaikille näytteille. Kokeet tehtiin pöly- ja savukokeita lukuun ottamatta molemmin puolin niille näytteille, missä vain toinen puoli oli päällystetty. Jos näytteen pinta- ja pohjapuoli olivat samanlaiset, koe tehtiin vain pintapuolelle.

Aiemmissa projektiin liittyneissä tutkimuksissa oli havaittu, että lasertehoa nostettaessa leikkausnopeus ei enää kasvanut tehon noston mukana leikattaessa päällystettyjä materiaaleja riittävän suurella teholla (ks. kuva 46). Seuraavissa kokeissa tavoitteena oli löytää jokin prosessiparametri, millä leikkausnopeus saataisiin jatkamaan tasaista kasvuaan tehon lisääntyessä. Samalla pyrittiin selvittämään prosessiparametrien merkitystä päällystettyjen materiaalien laserleikkauksessa yleisesti. Nämä kokeet tehtiin vain karbonaattipäällystetyille näytteille 102 ja 108 sekä vertailun vuoksi päällystämättömälle näytteelle 31.

- Noin 80 %:n eli 1700W:n teholla ja tästä ylöspäin leikkausnopeus ei enää kasva lasertehon funktiona normaalisti. Tällä teholla määritettiin polttopisteen paikka uudestaan. Näin saatua tulosta voitiin verrata 18% teholla määritettyyn polttopisteen paikkaan.

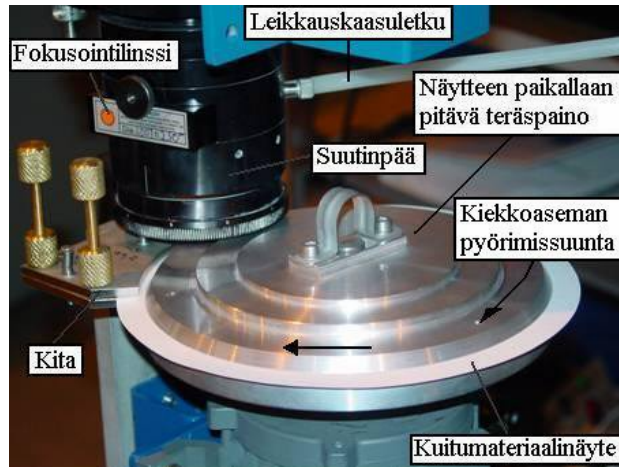
- Leikkauskaasun paine oli kaikissa peruskokeissa 5 bar. Kaasunpaineekokeessa leikkauskaasun painetta nostettiin asteittain 0 bar:sta aina 15 bar:iin. Teho valittiin tässä kokeessa siten, että se oli kullakin näytteellä sillä teho/nopeus-käyrän alueella missä leikkausnopeus ei enää kasva tehonnoston myötä. Näytteellä 31, missä leikkausnopeus kasvaa normaalisti tehon noston mukana, käytettiin samaa tehoa kuin näytteellä 102.
- Suurella teholla testattiin myös leikkauskaasun lajin vaikutusta leikkausnopeuteen. Leikkauskaasun paineena pidettiin 5 bar.
- Sivupuhalluskokeessa normaalin leikkauskaasun lisäksi syntyvään leikkausuraan syötettiin sivusta leikkausuran suuntaisesti paineilmaa 3 bar:n paineella. Suuttimena kokeessa käytettiin Silvent ilmaveistä.
- Suuttimen asema normaalikokeissa oli 0,2 mm näytteen pinnan yläpuolella. Noin 80 % laserteholla leikkauksia tehtiin 0,2 mm:n välein eri suutinkorkeuksilla 0 mm:stä 2 mm:iin.
- Myös suuttimen reiän koolla ja muodolla pyrittiin vaikuttamaan leikkausnopeuteen suurella teholla. Leikkauksia kokeiltiin 1 mm, 1,5 mm, 2 mm ja 2 x 1 mm kokoisilla suuttimilla.

10.4 Leikkausten toteutus

Lasersäde johdettiin työasemalle peileillä ja fokusoitiin Lasermechin leikkauspäässä olleella sinkkiselenidilinssillä. Leikkaukset suoritettiin pyörittämällä näytettä joko kiekkoasemalla tai rumpuasemalla lasersäteen ollessa paikallaan. Säde oli tasopolarisoitunutta ja polarisaation suunta oli koko ajan syntyvän leikkausuran suuntainen.

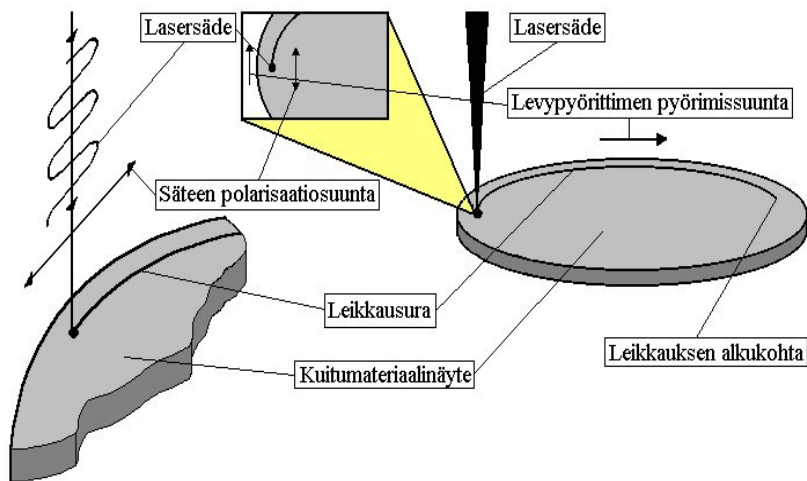
Halkaisijaltaan 200 mm kartonkikiekko kiinnitettiin kiekkoasemaan kiekon keskellä olevasta reiästä. Kiekon päälle asetettiin teräslevy painoksi. Lisäksi kiekon reuna oli

tuettu leikkaussuuttimen kohdalla metallisella kidalla, jonka tehtävänä oli estää kiekon liike säteen polttopisteen suhteen. (kuva 60)



Kuva 60. Työssä käytetty kiekkoasema ja näytteen kiinnitys./39/

Säteen asema näyttekiekkoon nähden oli 90 mm kiekon keskustasta. Kiekosta leikattiin 180 – 300 asteen sektori lyhyellä laserpulsilla (kuva 62). Ennen kutakin leikkausta tarkistettiin polttopisteen paikka, suuttimen asema näytteeseen nähden, kiekon pyörimisnopeus, laserteho, laserpulsin kesto aika ja leikkauskaasun paine. Käytetty laserteho saatiin vertaamalla laserin ilmoittamaa tehoa työasemalta mitattuun tehoon. Näin laserin ilmoittama teho voitiin muuntaa todelliseksi tehoksi sopivalla kertoimella eikä tehoa tarvinnut mitata joka kerta uudestaan.



Kuva 61. Kiekkoseman leikkausmenetelmä./39/

Rumpuasemalla leikattiin ohuita materiaaleja tai muuten sellaisia näytteitä, joilla leikkausnopeus ylitti kiekkoaseman maksimipyöritysnopeuden 2300 rpm tehoa riittävästi lisättäessä. Rumpuasemalla 100 mm leveä paperinäytesuikale kiinnitettiin teipillä rumpun pintaan (kuva 62). Näyte leikattiin vajaan kierroksen matkalta siten, että se ei missään vaiheessa leikkaantunut kahteen kertaan. Näytteen kiinnitystä ja pyörityssuuntaa lukuun ottamatta leikkausmenetelmä oli sama kuin kiekkoasemalla.



Kuva 62. Ohuiden materiaalien leikkaamiseen käytetty rumpuasema.

10.5 Leikattujen materiaalien analysointi

Kunkin näytteen kohdalla pyrittiin etsimään tietylle teholle maksimaalinen leikkausnopeus, jolla leikkaus vielä meni näytteestä täysin läpi. Leikkauksen onnistumista arvioitiin silmämääräisesti. Leikkaus oli onnistunut, kun leikattu reuna oli irti jokaisesta leikkausuran kohdasta ja leikkausurassa ei näkynyt yhtään toisesta reunastaan kiinni jäänyttä kuitu- tai päällystysmateriaalia.

Noin joka toisen leikatun näytteen leikkausurasta otettiin mikroskooppiin kiinnitetyllä digitaalikameralla kuva leikkausuran leveyden määrittämiseksi. Kuva otettiin uran molemmin puolin noin 1 cm:n päästä leikkauksen loppukohdasta. Digitaalista

mikroskooppikuvaa tietokoneohjelmalla analysoimalla, saatiin määritettyä leikkausuran keskimääräinen leveys ja muoto.

Leikkauksissa syntyvän paperipölyn määrää arvioitiin imemällä pölyä pumpulla suodattimeen ja punnitsemalla suodatin. Kaikkea leikkausurassa syntynyttä pölyä oli mahdoton saada talteen, joten tällä voitiin lähinnä vertailla eri materiaaleja keskenään.

Laserleikkauksessa syntyy myös jonkin verran erilaisia kaasuja materiaalin höyrystyessä. Näitä pyrittiin analysoimaan imemällä syntyneitä kaasuja ioninvaihtohartsin läpi. Ioninvaihtohartsi analysoitiin Stora Enson Tutkimuskeskuksella massaspektrometrilla.

11 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

11.1 Päälylystämisen vaikutus polttopisteen paikkaan

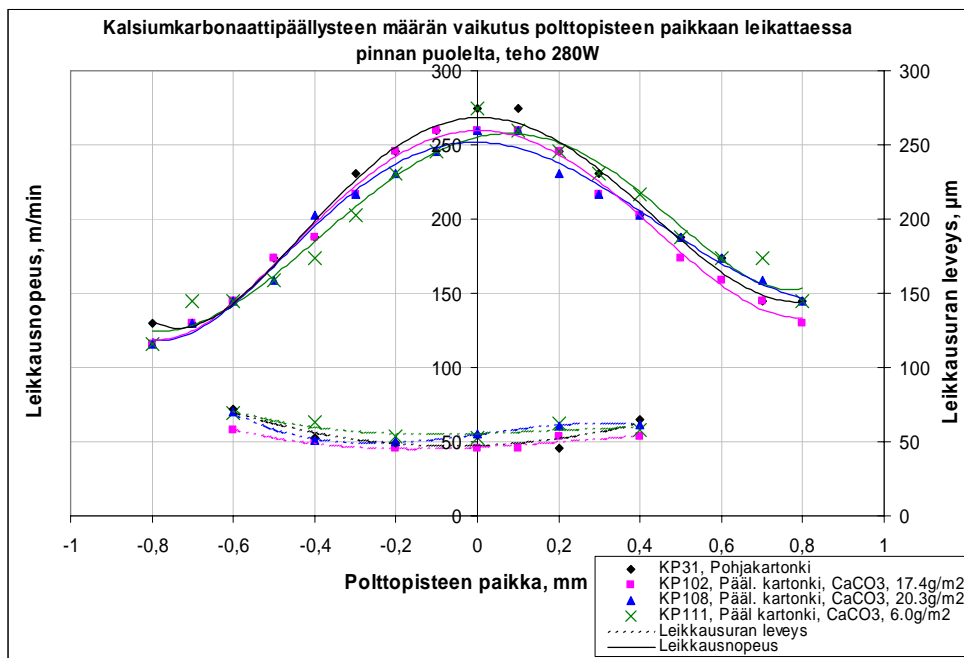
Kaikille leikattaville näytteille määritettiin ensimmäiseksi optimi polttopisteen paikka. Leikkausnopeus oli suurimmillaan ja laserteho kohdistui pienimmälle mahdolliselle alueelle leikattavassa materiaalissa, kun polttopisteen paikka oli paras mahdollinen leikattavan materiaalin pintaan nähden. Samalla leikkausurasta tuli kapea ja reunaltaan suora.

Optimi polttopisteen paikka kartonkinäytteille määritettiin leikkaamalla kartonkia kiekkoasemalla 18 %:n eli noin 280 W:n laserteholla. Suurin mahdollinen leikkausnopeus etsittiin aluksi polttopisteen asemalle, joka oli 0,8 mm näytteen pinnan alapuolella. Tästä polttopisteen paikkaa nostettiin 0,1 mm:n välein aina kohtaan 0,8 mm näytteen pinnan yläpuolella.

Paperinäytteille polttopisteen paikka määritettiin leikkaamalla näytteitä rumpuasemalla 75 % laserteholla ja 50 % säteenjakajalla. Leikattavan paperin pinnalla laserteho oli noin 830 W. Polttopisteen paikkaa muutettiin, samoin kuin kartongilla, välillä $\pm 0,8$ mm. Polttopisteen paikkaa nostettiin 0,2 mm:n välein.

11.1.1 Päälysteen määrän vaikutus polttopisteen paikkaan

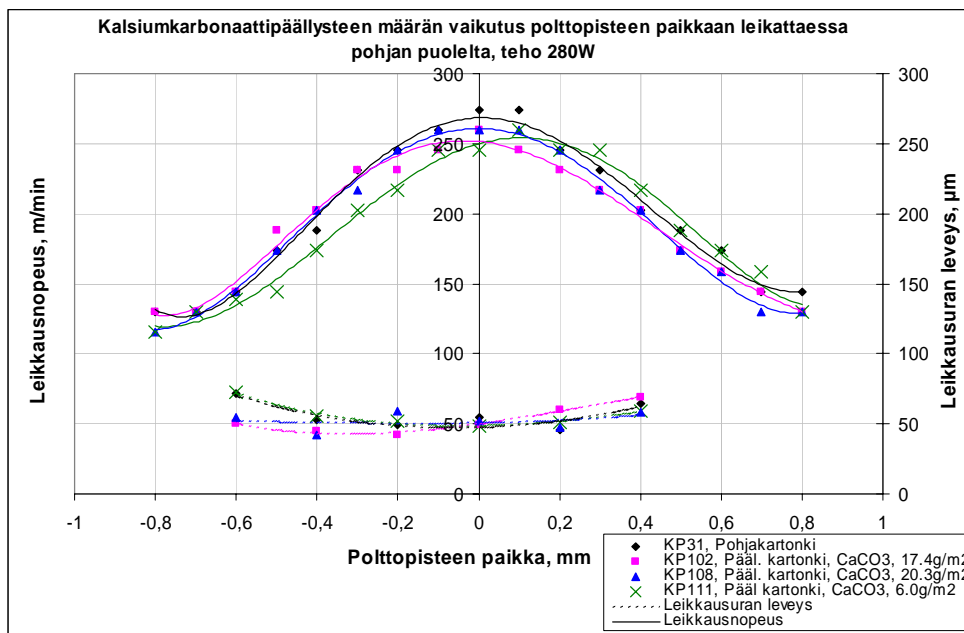
Päälysteen määrän vaikutus polttopisteen paikkaan karbonaattipäälysteisellä kartongilla on esitettyä kuvassa 63. Leikkaus on suoritettu pinnan eli päälysteen puolelta. Leikkaukset suoritettiin noin 280 W:n teholla. Seuraaviin kuviin on merkitty myös syntyneen leikkausuran leveys. Leikkausuran leveyteen liittyvät pisteet on yhdistetty pisteiden värisellä katkoviivalla ja polttopisteen paikka yhtenäisellä viivalla.



Kuva 63. Päälysteen määrän vaikutus optimi polttopisteen paikkaan leikattaessa karbonaattipäälysteistä kartonkia pinnan puolelta.

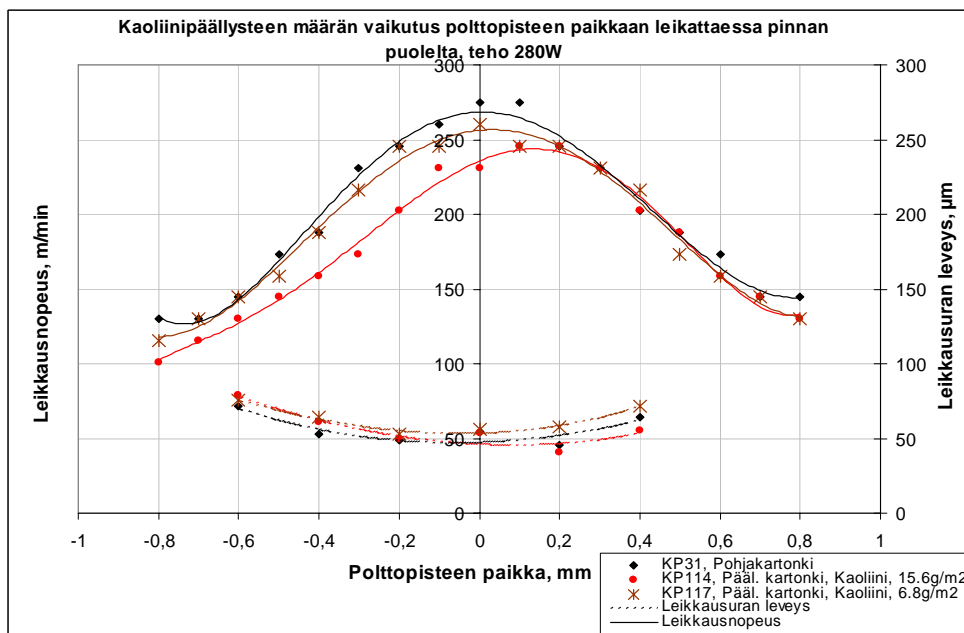
Karbonaattipäälysteen määrällä ei ole mitään vaikutusta optimipolttopisteen paikkaan. Leikkausnopeus on suurimmillaan kun lasersäteen polttopiste on asetettu kohtaan 0 mm eli näytteen pintaan. Leikkausuran leveytuloksista nähdään, että leikkausura on kapeimmillaan juuri sellaisen polttopiste lukeman kohdalla missä leikkausnopeus on suurimmillaan.

Kuvasta 64 nähdään, että kalsiumkarbonaatti päälysteen määrä ei vaikuta polttopisteen paikkaan myöskään pohjan puolelta leikattaessa. Leikkausnopeus on suurimmillaan, kun polttopisteen paikka on kohdassa 0 – 0,1 mm.



Kuva 64. Päällysteen määrän vaikutus optimi polttopisteen paikkaan leikattaessa karbonaattipäällysteistä kartonkia pohjan puolelta.

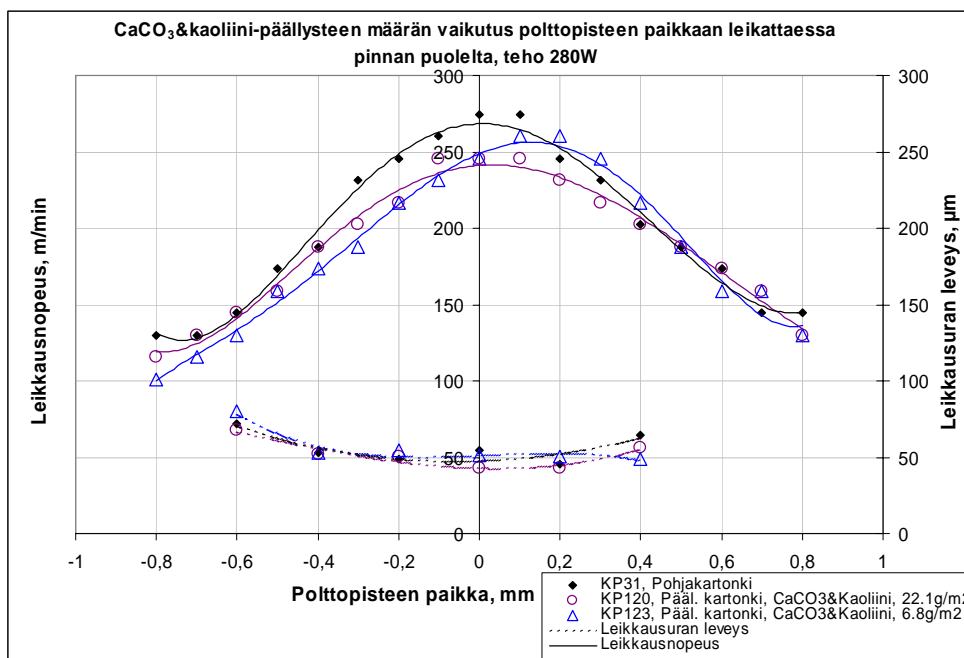
Päällysteen määrän vaikutus kaoliinilla päällystettyjen kartonkien optimi polttopisteen paikkaan on esitetty kuvassa 65.



Kuva 65. Päällysteen määrän vaikutus optimi polttopisteen paikkaan leikattaessa kaoliinipäällysteistä kartonkia pinnan puolelta.

Myöskään kaoliinipäällysteen määrä ei vaikuta optimipolttopisteen paikkaan. Näytteellä 114 polttopisteen optimi paikka on hieman kartongin pinnan yläpuolella, mutta tämä vaikuttaa enemmänkin satunnaiselta vaihtelulta, koska hieman vähemmän päällystetyn näytteen 117 paras polttopisteen paikka on sama kuin päällystämättömällä pohjakartongilla. Pohjan puolelta leikkattaessa kuvaaja on lähes identtinen kuvaan 64 verrattuna (ks. liite I).

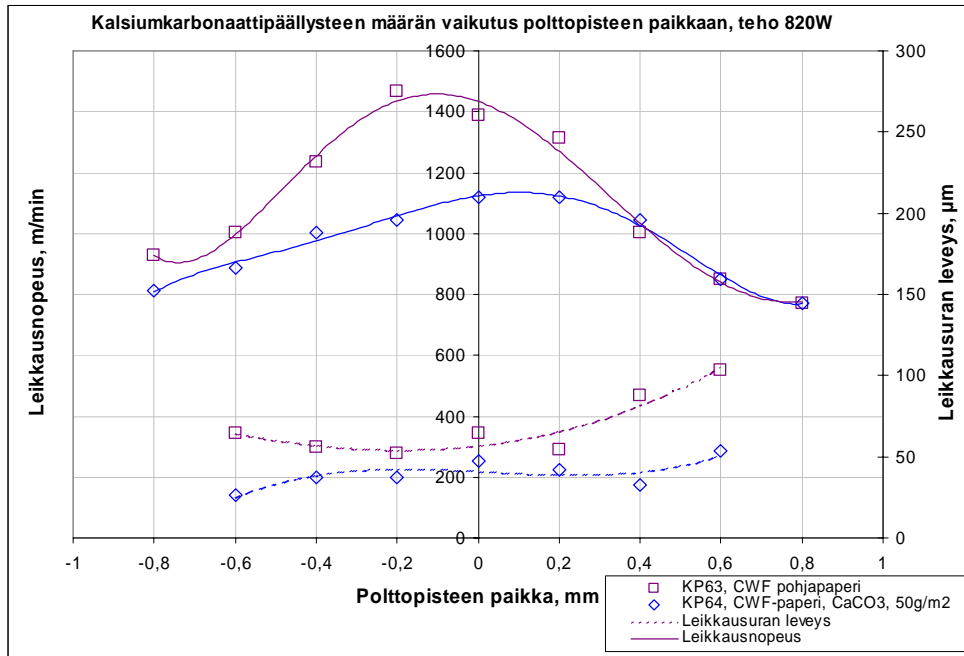
Karbonaatin ja kaoliinin seoksella päällystettyjen näytteiden 120 ja 123 tulokset on esitettyä kuvassa 66. Myös niissä tulokset ovat samansuuntaisia kuin edellisissä kuvissa. Kuvan 66 leikkaukset on suoritettu pinnan puolelta. Pohjan puolelta tehtyjen leikkausten tulokset ovat liitteessä I.



Kuva 66. Päällysteen määrän vaikutus optimi polttopisteen paikkaan leikkattaessa kaoliinilla ja karbonaatilla päällystettyjä kartonkeja pinnan puolelta.

Papereilla parhaan polttopisteen paikan määrittäminen on hieman epävarmempaa kuin kartongeilla. Tämä johtuu ohuemmasta materiaalista ja erilaisesta leikkausmenetelmästä. Rummun pintaan kiinnitetty näyte nousee hieman rummun pinnasta keskipakovoiman vaikutuksesta. Tämä liike on säteen akselin suuntainen, joten jos paperi nousee rummun pinnasta se vaikuttaa todelliseen polttopisteen

paikkaan. Paperinäytteet leikattiin vain toiselta puolelta ja tulokset on esitetty kuvassa 67. Näissä kokeissa lasertehto oli noin 830 W.



Kuva 67. Päällystyksen määrän vaikutus polttopisteen paikkaan leikattaessa CWF-paperia laserilla.

Paperin päällystämällä ei ollut vaikutusta polttopisteen paikkaan.

Kumpikaan käytetyistä päällystyspigmenteistä ei erottunut optimin polttopisteen paikansuhteen. Vertailutaulukko eri pigmenttien välillä, päällystys annostuksella 6-7 g/m², on liitteessä I.

11.2 Päällystämisen vaikutus lasertehtoon ja leikkausnopeuteen

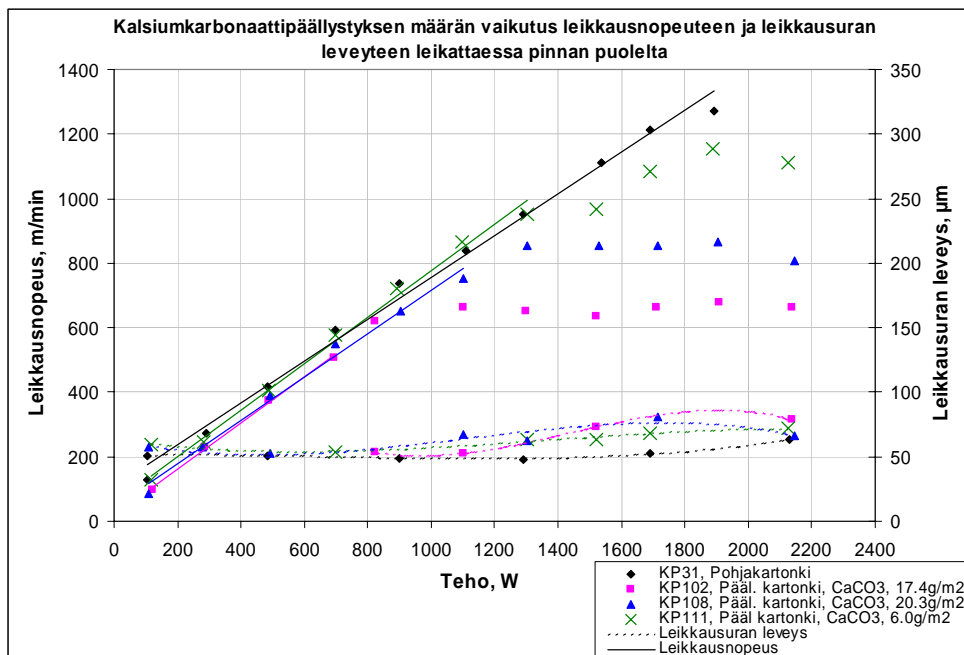
11.2.1 Päällysteen määrän vaikutus leikkausnopeuteen

Määritettäessä leikkausnopeuden riippuvuutta lasertehosta polttopisteen asema pidettiin kappaleen 11.1 kokeissa kullekin materiaalille määritetyssä optimissa. Tämä optimi on se polttopisteen asema näytteeseen nähden, jossa leikkausnopeus oli maksimissaan. Leikkausnopeuskokeessa tehoa nostettiin 9 prosenttiyksikön askelilla välillä 9 – 100 %.

Kullekin teholle etsittiin maksimileikkausnopeus, jolla leikkaus meni vielä täysin näytteen läpi.

Seuraavissa kuvissa jatkuvalla viivalla yhdistetyt pisteet edustavat leikkausnopeutta ja katkoviivalla yhdistetyt pisteet syntyneen leikkausuran leveyttä. Leikkausnopeuden tuloksien kaikkia pisteitä ei ole yhdistetty viivalla, jos leikkausnopeus ei ole jostakin tehon arvosta lähtien enää suoraan verrannollinen leikkaustehoon. Teorian mukaan leikkausnopeuden pitäisi olla suoraan verrannollinen käytettyyn lasertehoon.

Kuvassa 68 on esitettyä leikkausnopeuden ja leikkausuran leveyden riippuvuus käytetystä lasertehosta leikattaessa karbonaattilla päällystettyjä kartonkeja pinnan puolelta. Karbonaattipäällysteisten näytteiden lisäksi kuvassa on vertailun vuoksi päällystämätön näyte 31. Karbonaattipäällysteisistä näytteistä 102 on näissä kuvissa mukana, koska sitä on käytetty aikaisemmissa tähän aiheeseen liittyneissä tutkimuksissa. Näyte 102 on hieman karkeampaa päällysteen pigmenttiä lukuun ottamatta kuin näyte 108.



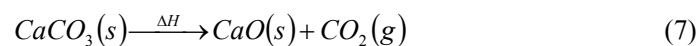
Kuva 68. Karbonaattipäällysteen määrän vaikutus leikkausnopeuteen ja leikkausuran leveyteen leikattaessa pinnan puolelta.

Kuvasta 68 nähdään, että mitä enemmän päällystettä on sitä aikaisemmassa vaiheessa leikkausnopeuden kasvu tehon funktiona lakkaa pinnan (päällysteen) puolelta leikattaessa. Ennen leikkausnopeuden kasvun loppumista leikkausnopeus on suoraan verrannollinen käytettyyn tehoon. Päällysteen määrän lisäys pienentää leikkausnopeutta hieman käyrän lineaarisella osalla. Näytteessä 102 on 3 g/m² vähemmän karbonaattipäällystettä kuin näytteessä 108, mutta sen pigmenttikoko on suurempi. Tämä saattaa olla syynä sen pienempään leikkausnopeuteen.

Päällystämättömän näytteen 31 suorasta puuttuu tehoarvo 100 %, koska kiekkoaseman pyöritysnopeus oli maksimissaan jo 90 % laserteholla. Suurempaankin leikkausnopeuteen olisi todennäköisesti ollut mahdollisuuksia.

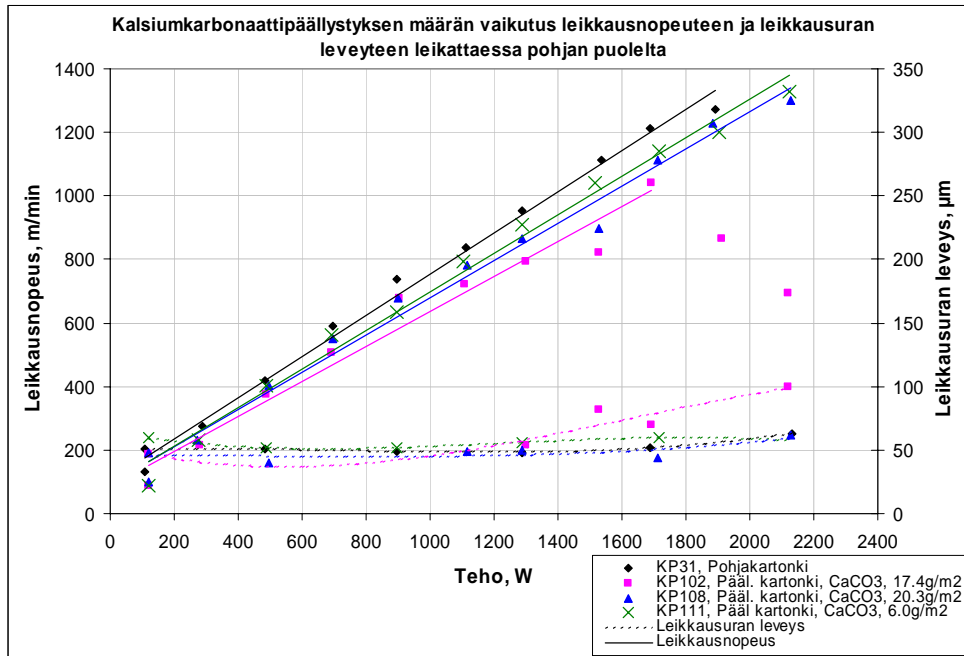
Leikkausnopeuden kasvun loppumisen myötä leikkausuran leveys kasvaa selvästi.

Leikkausnopeuden kasvun loppuminen johtuu todennäköisesti osaltaan syntyvän pigmenttipölyn aiheuttamasta lasersäteiden sironnasta. Pääsyy lienee kuitenkin kalsiumkarbonaatin hajoaminen. Kalsiumkarbonaatti hajoaa kuumennettaessa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi kaavan 7 mukaan



Tähän hajoamisprosessiin kuluu lasersäteiden energiaa. Lisäksi hajoamisessa syntynyt hiilidioksidi absorboi lasersäteiden energiaa samaan tapaan kuin resonaattorissakin. Näin lasersäteiden teho pysyy näytteen pinnassa käytännössä vakiona niin kauan kuin kalsiumkarbonaattipäällysteestä syntyy leikattaessa riittävästi hiilidioksidia. Kalsiumkarbonaatti absorboi CO₂-lasersäteiden energiaa vain noin 6,4 %:n /53/ teholla, joten lasersäteiden suorasta absorptiosta kalsiumkarbonaattiin ei ehkä vielä synny tarpeeksi hiilidioksidia rajoittamaan leikkausnopeutta. Mutta karbonaatti lämpiää polttopisteessä todennäköisesti myös johtumalla. Mitä enemmän päällystettä on, sitä nopeammin syntyy riittävä määrä hiilidioksidia absorboimaan lasersädettä. Tehon lisääntyessä hiilidioksidin määrä polttopisteessä lisääntyy ja lisätty laserteho absorboituu kasvaneeseen hiilidioksidin määrään, joten leikkausnopeus pysyy vakiona.

Pohjan puolelta suoritettujen leikkausten koetulokset on esitetty kuvassa 69.

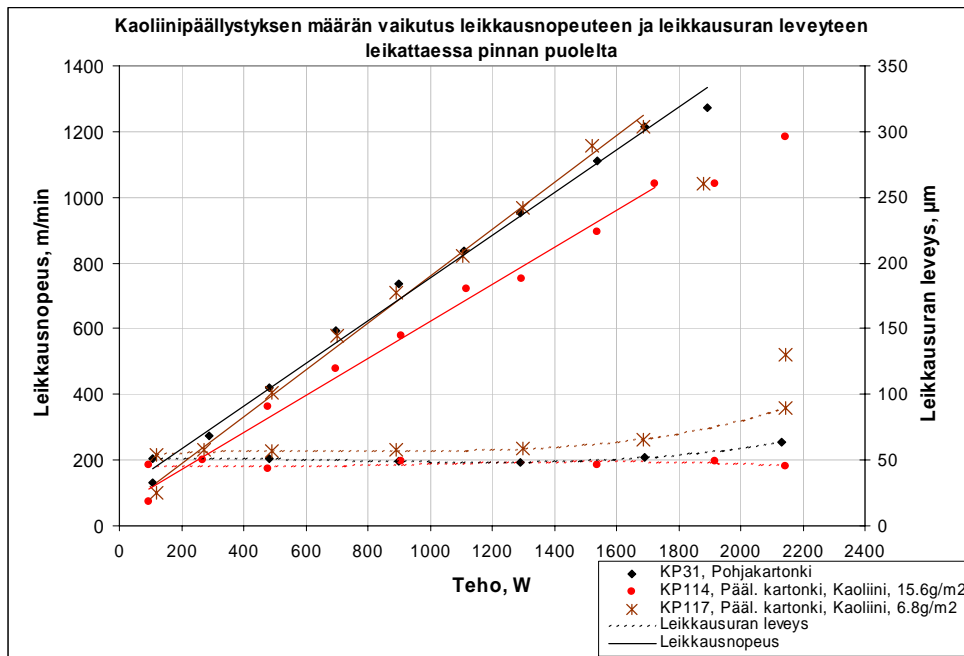


Kuva 69. Karbonaattipäällysteen määrän vaikutus leikkausnopeuteen ja leikkausuran leveyteen leikattaessa pohjan puolelta.

Pohjan puolelta leikattaessa leikkausnopeus nousee lineaarisesti lasertehon funktiona kaikilla muilla paitsi näytteellä 102. Kuvasta 69 nähdään selvemmin päällystyksen määrän vaikutus leikkausnopeuteen. Mitä enemmän päällystettä on, sitä pienempi on suoran kulmakerroin. Eli tietyllä teholla leikkausnopeus pienenee päällystyksen määrän lisääntyessä. Näytettä 102 lukuun ottamatta leikkausnopeuden kasvu ei kuitenkaan lakkaa missään vaiheessa tehoa nostettaessa.

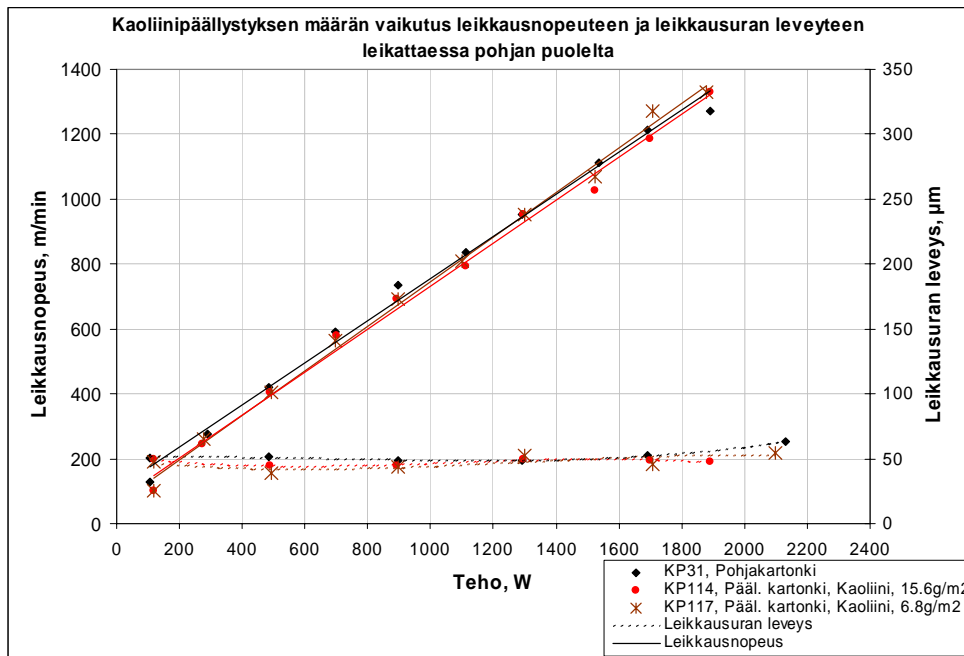
Leikkausuran leveys pysyy lähes vakiona, kun leikkausnopeus on suoraan verrannollinen käytettyyn lasertehoon. Kaikissa tapauksissa leikkausura on kapeampi käyrän lineaarisella osalla niillä materiaaleilla, millä leikkausnopeus on pienempi.

Kaoliinilla päällystettyjen kartonkien leikkausnopeustulokset on esitetty kuvissa 70 ja 71.



Kuva 70. Kaoliinipäällysteen määrän vaikutus leikkausnopeuteen ja leikkausuran leveyteen leikattaessa pinnan puolelta.

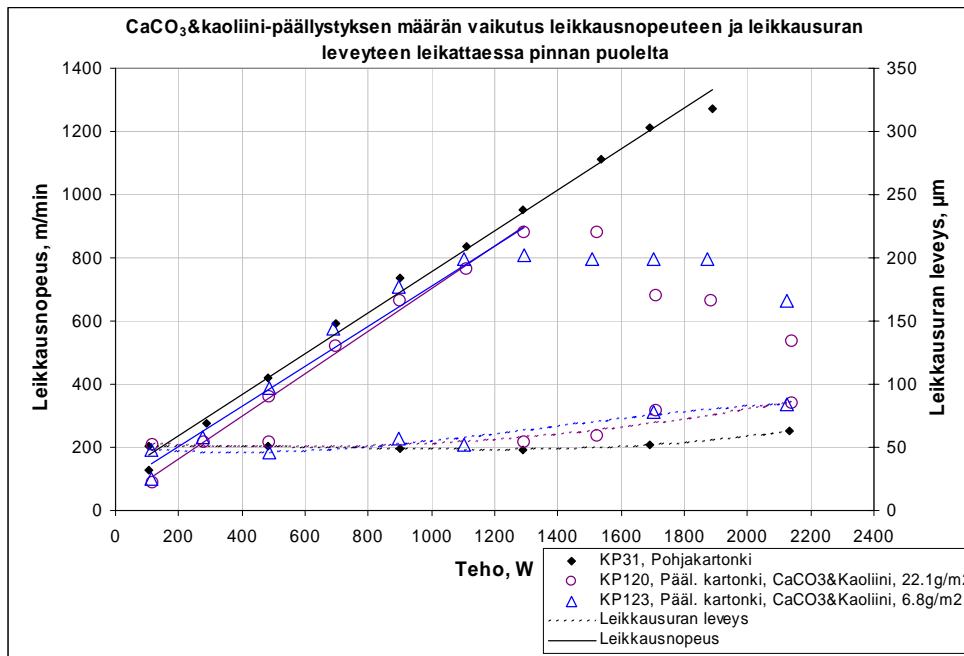
Suuremmalla kaoliinimäärällä päällystetty kartonkinäyte 114 leikkautuu selvästi hitaammin kuin päällystämätön kartonki. Samalla leikkausura muodostuu kapeammaksi. Kaoliini käyttäytyy siis näiltä osin samoin kuin karbonaatti. Suuremmilla tehoilla myös kaoliinilla päällystettyjen kartonkien leikkaaminen on epävakaata. Lasersäteen energiaa kuluu tässä tapauksessa todennäköisesti kaoliinin kideveden poistoon. Lisäksi kaoliinipartikkelit voivat sirottaa lasersädettä jonkin verran.



Kuva 71. Kaoliinipäällistyksen määrän vaikutus leikkausnopeuteen ja leikkausuran leveyteen leikattaessa pohjan puolelta.

Pohjan puolelta leikattaessa leikkausnopeus on suoraan verrannollinen laserteeseen kaikilla testatuilla kaoliinipäällistetyillä kartongeilla. Leikkausuran leveys pysyy lähes vakiona.

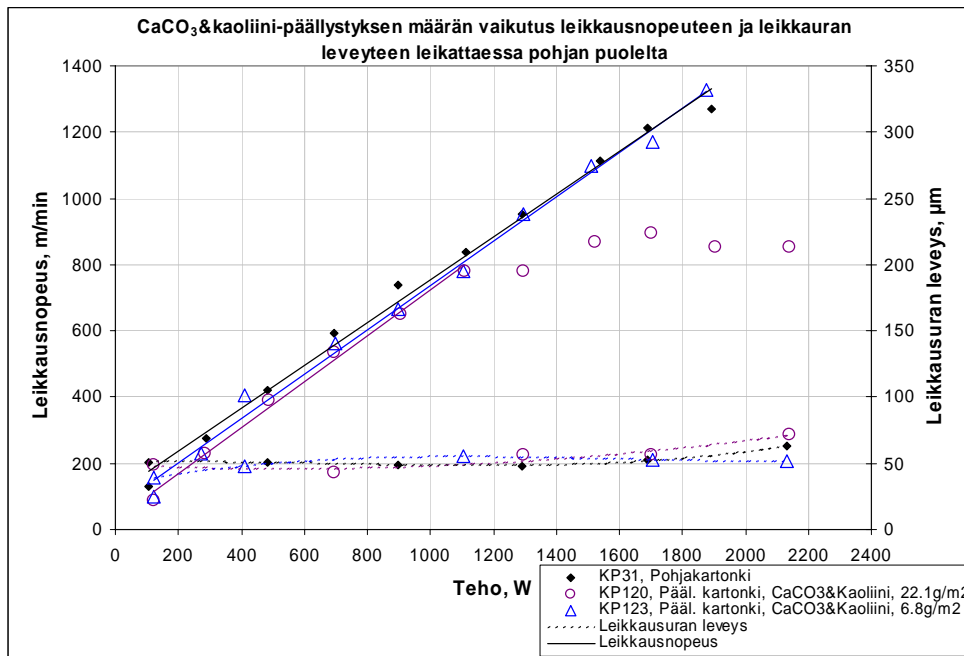
Kaoliinin ja karbonaatin seoksella päällistettyjen kartonkien leikkausnopeuskokeiden tulokset on esitetty kuvissa 72 ja 73.



Kuva 72. Kaoliini-karbonaattipäällysteen määrän vaikutus leikkausnopeuteen ja leikkausuran leveyteen leikattaessa pinnan puolelta.

Karbonaatin ja kaoliinin seoksella päällystetyt kartongit käyttäytyvät leikattaessa samoin kuin karbonaatilla päällystetyt kartongit. Tästä voi päätellä, että kalsiumkarbonaatti on eniten leikkaustulokseen vaikuttava pigmentti. Noin 1300 W ja suuremmalla teholla leikattaessa sekä 22,1 g/m² että 6,8 g/m² näytteiden leikkausnopeus lakkaa kasvamasta tehonlisäyksen mukana. Samalla leikkausuran leveys kasvaa.

Kalsiumkarbonaatin ja kaoliinin seoksen leikkausnopeuden aleneminen suuremmilla tehoilla johtuu siitä, että kaoliini johtaa absorboimaansa lämpöä kalsiumkarbonaattiin, joka puolestaan hajoaa hiilidioksidiksi ja kalsiumoksidiksi nopeammin kuin ollessaan yksistään päällystyspigmenttinä. Lasersädetä absorboivaa hiilidioksidia muodostuu enemmän ja nopeammin, joten leikkausnopeus jopa laskee suuremmilla tehoilla leikattaessa.



Kuva 73. Kaoliini-karbonaattipäällysteen määrän vaikutus leikkausnopeuteen ja leikkausuran leveyteen leikattaessa pohjan puolelta.

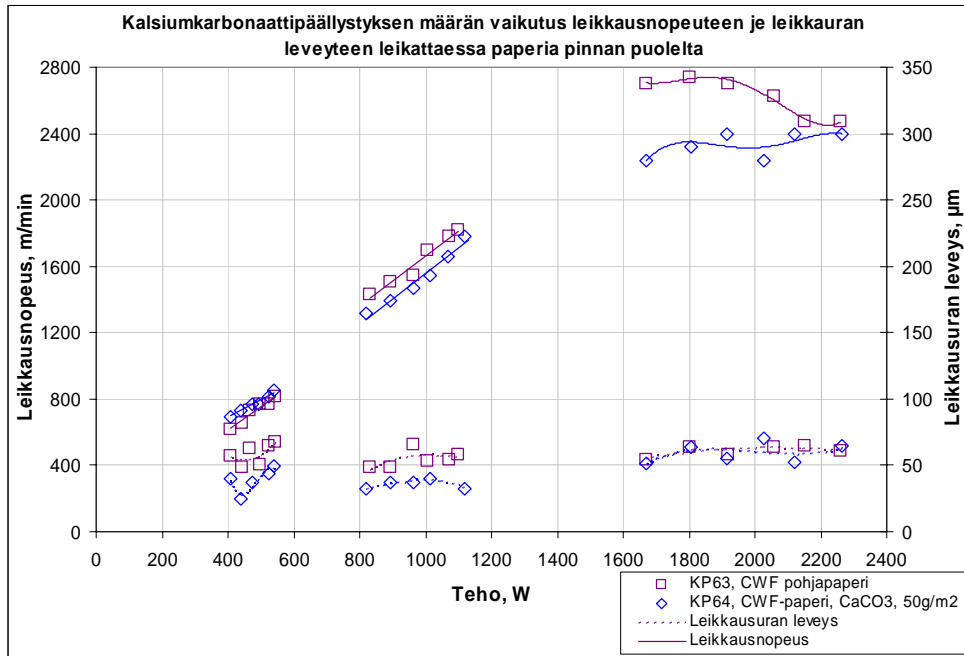
Pohjan puolelta leikattaessa $6,8 \text{ g/m}^2$ päällystetyn kartongin leikkausnopeus on tutkitulla tehoalueella lineaarisesti riippuvainen lasertehosta. Suuremmalla päällysteen määrällä leikkausnopeuden riippuvuus tehosta on lähes sama kuin pinnan puolelta leikattaessa.

Kuvassa 74 on esitettyä päällystämättömän ja päällystetyn CWF-paperin leikkausnopeustulokset. Paperinäytteitä leikattiin vain kaksi. Kuvan 74 tuloksia tarkastellessa on hyvä pitää mielessä, että molemmat näytteet sisälsivät täyteaineena kalsiumkarbonaattia.

Paperinäytteet leikattiin CW-teholla, koska paperiin leikkautuisi vain rivi reikiä suuremmilla nopeuksilla pulssiteholla leikattaessa.

Kuvassa 74 kullakin näytteellä leikkausnopeus ja leikkausuran leveys on kuvattu kolmen käyrän ryppäinä. Tämä johtuu siitä, että CW-säteellä pienin laserista ulos tuleva teho on 75 % eli noin 1650 W. Leikkaukset oli suoritettava ilman säteenjakajaa

sekä 20 % ja 50 % säteenjakajilla, jotta päästäisiin määrittämään alempien CW-tehojen leikkausnopeuksia.



Kuva 74. Päällistyksen määrän vaikutus CWF-paperin laserleikkaukseen.

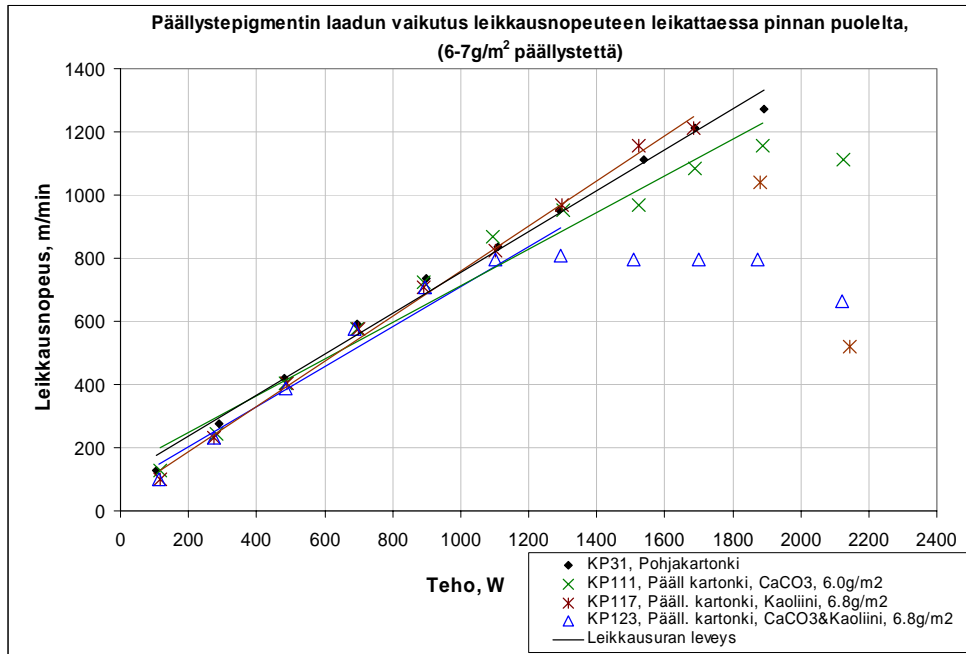
Karbonaattipäällistys vaikuttaa papereiden laserleikkaukseen samalla tavalla kuin kartongeillakin. Tietyllä teholla saavutettava leikkausnopeuden maksimi on pienempi päällistetyllä paperilla kuin päällistämättömällä. Toisaalta leikkausuran leveys on pienempi päällistetyllä paperilla. Paperinäytteillä leikkausnopeus jää vakioksi noin 1400 W:sta ylöspäin. Näin käy siis myös päällistämättömälle paperille. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että molemmissa paperinäytteissä on täyteaineena kalsiumkarbonaattia 15 – 18 g/m².

11.2.2 Päällistepigmentin vaikutus leikkausnopeuteen

Kuvissa 75 ja 76 on esitettyä leikkausnopeustulosten vertailu kolmen eri pigmenttityypin kesken. Päällistettä näissä näytteissä oli 6 – 7 g/m².

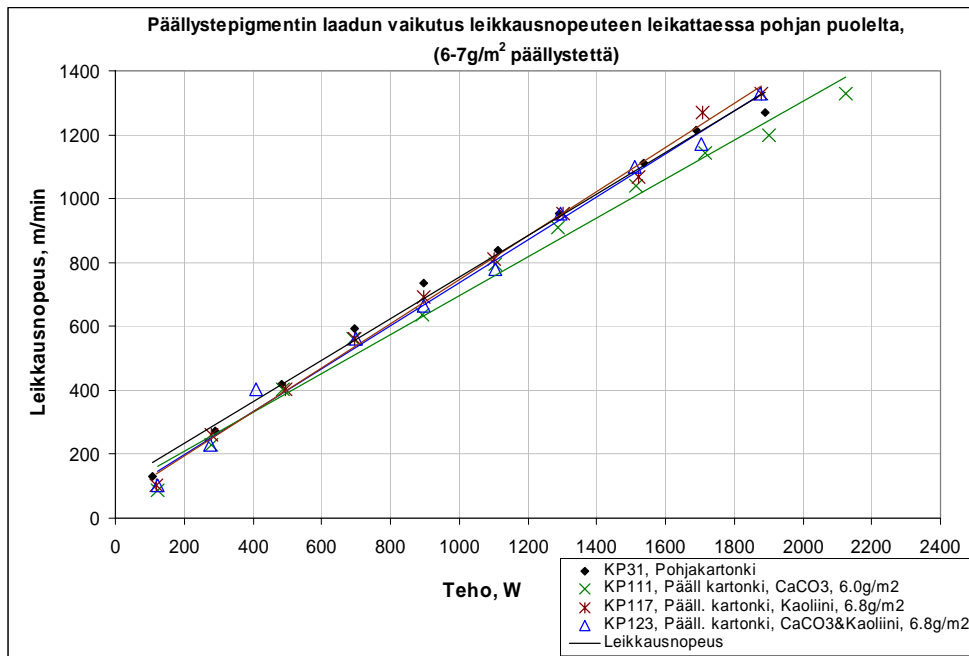
Päällistepigmenteistä kalsiumkarbonaatti alentaa leikkausnopeutta tietyllä teholla eniten. Toisaalta kaoliini saattaa ikään kuin katalysoida kalsiumkarbonaatin hajoamista ja leikkausnopeus alenee seospigmentillä päällistetyllä materiaalilla nopeammin.

Leikkausnopeuksien ero eri pigmenttien välillä todennäköisesti kasvaa päällystyksen määrän kasvaessa.



Kuva 75. Päällystepigmentin vaikutus leikkausnopeuteen leikattaessa pinnan puolelta. Päällystetyissä näytteissä päällystettä on 6 – 7 g/m².

Pohjan puolelta leikattaessa leikkausnopeus on aina lineaarisesti riippuvainen käytetystä lasertehosta. Kuitenkin myös pohjan puolelta leikattaessa kalsiumkarbonaattipäällystys alentaa leikkausnopeutta tietyllä teholla eniten.

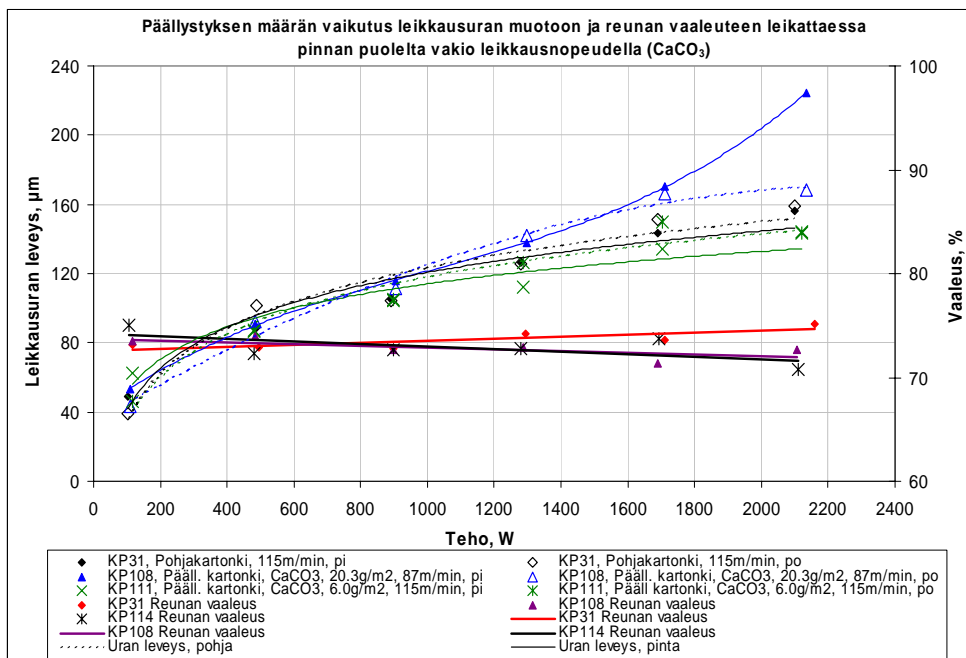


Kuva 76. Päällystepigmentin vaikutus leikkausnopeuteen leikattaessa pinnan puolelta. Päällystetyissä näytteissä päällystettä on 6 – 7 g/m².

11.3 Päällystyksen vaikutus leikkausuran muotoon ja reunan vaaleuteen

Seuraavissa kokeissa leikkausnopeudeksi valittiin kullekin materiaalille se nopeus, jolla leikkaus meni täysin näytteen läpi 9 %:n laserteholla leikattaessa. Tämä 9 % vastaa noin 110 W:n tehoa työasemalla.

Kuvassa 77 on esitettyä kalsiumkarbonaattipäällystyksen vaikutus leikkausuran leveyteen leikattaessa pinnan puolelta vakio leikkausnopeudella. Kuvassa yhtenäisellä viivalla yhdistetyt pisteet edustavat leikkausuranleveyttä, joka on mitattu lasersäteen tulopuolelta eli tässä tapauksessa kartongin pinnalta. Katkoviivalla yhdistetyt pisteet edustavat uran leveyttä pohjan puolelta mitattuna. Paksulla viivalla yhdistetyt pisteet kuvaavat leikatun reunan tummumista ylimääräisen lasertehon vaikutuksesta. Reunasta otetun mikroskooppikuvan pikseleiden vaaleutta verrattiin täysin valkoiseen pikseliin.



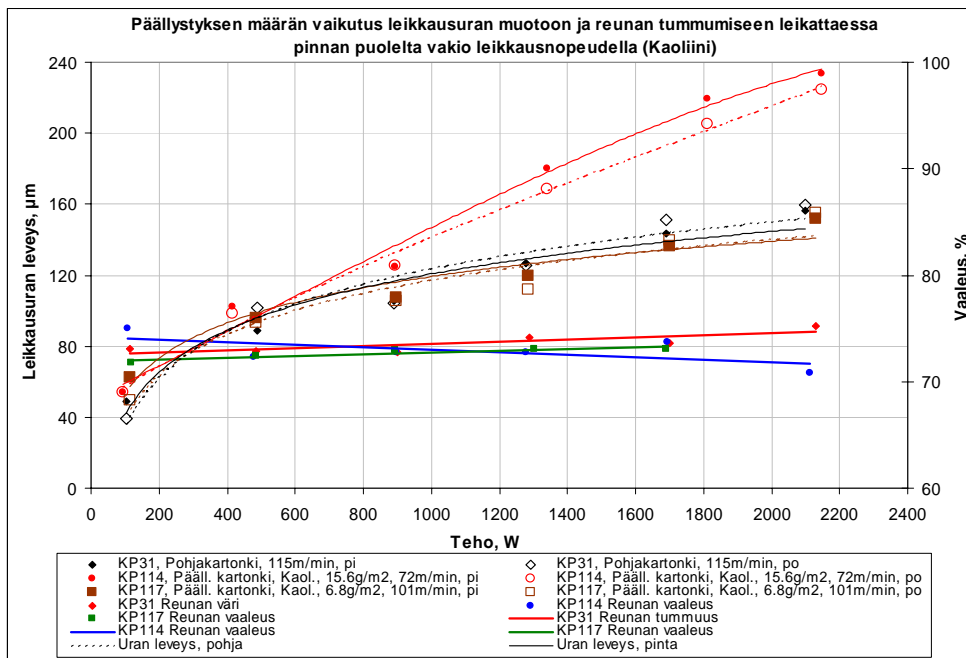
Kuva 77. Kalsiumkarbonaattipäälystykseen määrän vaikutus leikkausuran muotoon ja reunan vaaleuteen leikattaessa pinnan puolelta vakioleikkausnopeudella.

Leikkausuran leveys nousee tehon lisäyksen myötä todennäköisesti logaritmisesti, vaikka näihin pisteisiin jokin toinen sovitus osuisikin paremmin. Lasersäteen polttopisteen kooksi ilmoitetaan se alue, johon osuu 87 % säteen tehosta polttopisteen halkaisijan suunnassa. Tehon lisääntyessä tämän 87 % alueen ulkopuolelle jäävä teho riittää levittämään leikkausuraan jonkin verran. Mutta koska polttopisteen halkaisija ei varsinaisesti kasva tehonlisäyksen mukana, ei myöskään leikkausuran leveys kasva loputtomasti.

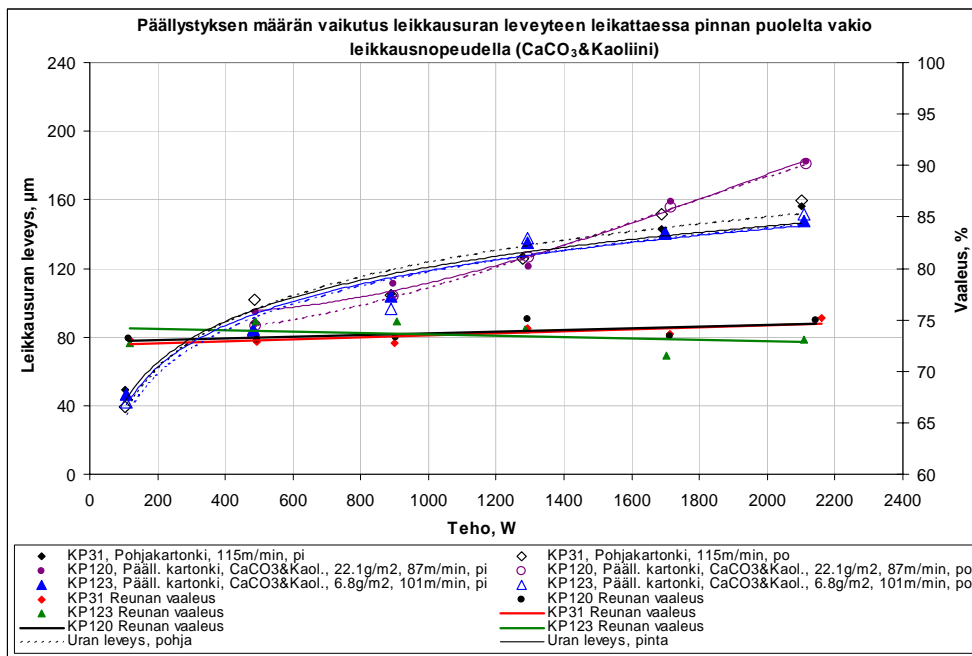
Leikkausura on hieman leveämpi pohjan puolella, koska lasersäde on kaikissa tapauksissa fokuoitu materiaalin pintaan. Kirjallisuusosan kuvassa 37 on havainnollistettu polttopisteen sijainnin vaikutusta leikatun reunan profiilin muotoon. Koska polttopiste on sijoitettu kaikilla näytteillä materiaalin pintaan tai hieman sen yläpuolelle, tulee leikatun uran profiilista hieman A-kirjaimen muotoinen. Erot pohja- ja pintapuolen uraleveyksien välillä ovat kuitenkin niin pieniä, että leikattu reuna on käytännössä lähes täysin suora.

Leikattu reuna tummuu ylimääräisen lasertehon vaikutuksesta vain vähän. Vaikka lasertehoa on käyrän yläpäässä jopa 15-kertainen määrä yli tarpeen, tummuu karbonaatilla päällystettyjen kartonkien reuna leikkauksessa vain muutaman prosenttiyksikön. Päällystämättömän kartongin reuna ei tummu ollenkaan.

Kaoliinilla (kuva 78) ja kalsiumkarbonaatin ja kaoliinin seoksella (kuva 79) päällystettyjen kartonkien leikkausurat ja reunat olivat samantyyppisiä kuin kalsiumkarbonaatilla päällystetyillä kartongeilla. Myös kaoliinilla päällystetyn kartongin leikkausreuna tummuu hieman ylimääräisestä tehosta. Vaikutus oli näissäkin tapauksissa varsin vähäinen.



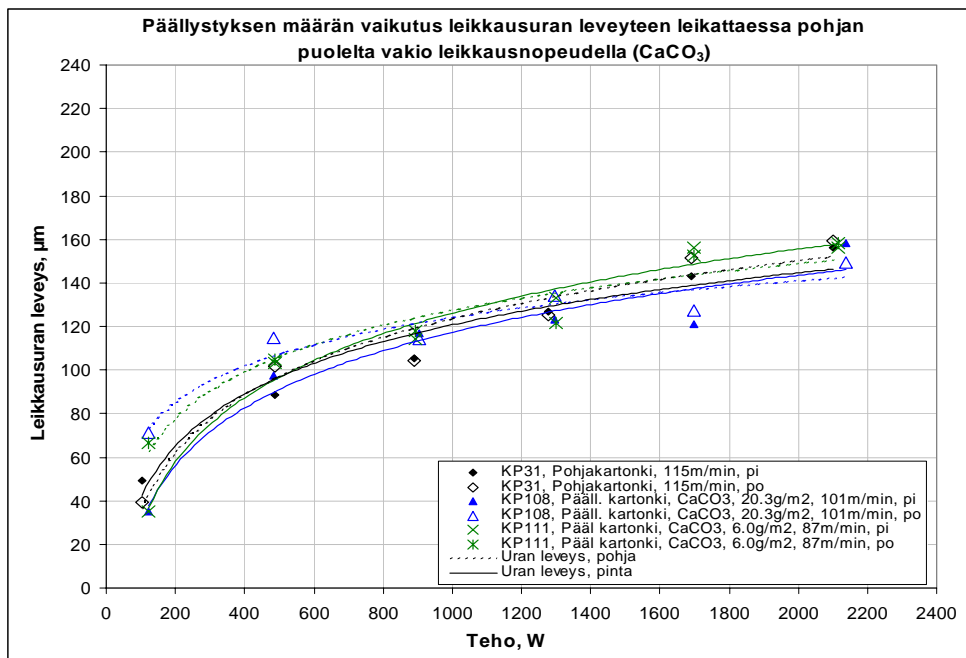
Kuva 78. Kaoliinipäällystykseen määrän vaikutus leikkausuran leveyteen leikattaessa pinnan puolelta vakio leikkausnopeudella.



Kuva 79. Kaoliini-karbonaattipäällysteen määrän vaikutus leikkausuran muotoon ja reunan vaaleuteen leikattaessa pinnan puolelta vakioleikkausnopeudella.

Leikkausuran leveys on suurempi niillä materiaaleilla, joilla leikkausnopeuden kasvu tehon funktiona lakkaa jollakin teholla.

Kuvassa 80 on esitettyä päällystyksen määrän vaikutus leikkausuran muotoon leikattaessa pohjan puolelta. Pohjan puolelta leikatuista reunoista ei otettu mikroskooppikuvia vaaleuden arvioimista varten.



Kuva 80. Kalsiumkarbonaattipäällistyksen määrän vaikutus leikkausuran leveyteen leikattaessa pohjan puolelta vakio leikkausnopeudella.

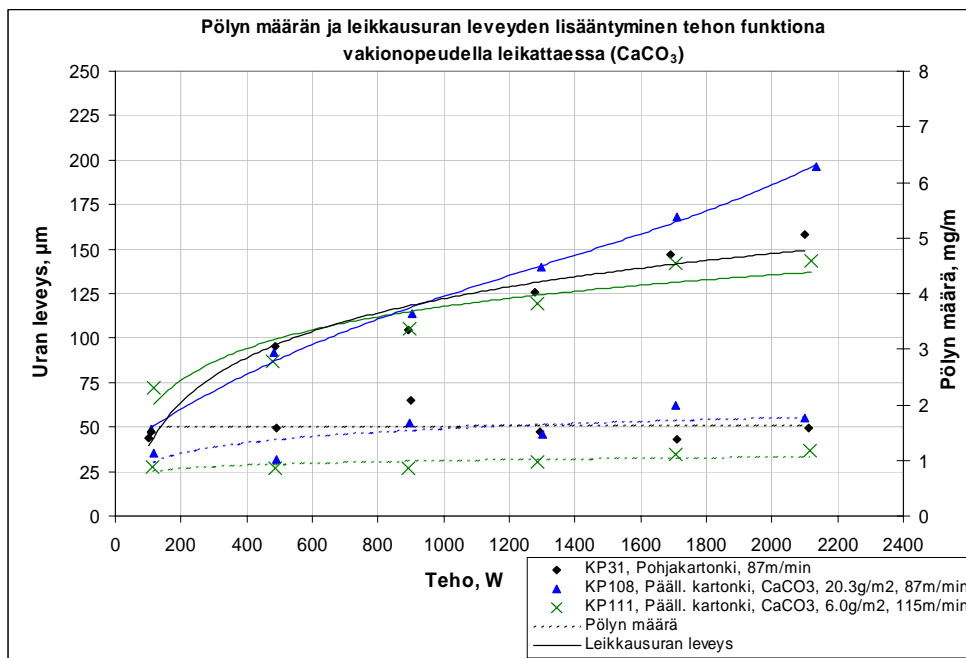
Pohjan puolelta leikattaessa leikkausurasta tulee säännöllisemmän muotoinen. Tämä johtuu siitä, että leikkausnopeus on kaikilla materiaaleilla suoraan verrannollinen käytettyyn lasertehoon. Kuvaajat kaoliinilla ja kaoliini-kalsiumkarbonaattiseoksella päällistettyjen materiaalien tuloksista liitteessä II.

11.4 Laserleikkauksissa syntyvän pölyn määrä

Laserleikkauksessa syntyvän paperipölyn määrän arvioimiseksi leikkaussuuttimen alapuolelle asennettiin putki, jonka päähän peräkkäin asetettiin 5 µm nitroselluloosa ja 0,2 µm polykarbonaattisuodattimiin leikkausurassa syntynyttä pölyä imettiin vakuumpumpulla. Leikkauspään aluetta ei kuitenkaan saatu täysin suljetuksi, joten suodattimeen päätyi vain osa syntyneestä pölystä. Seuraavissa kuvissa esitettyjä pölyn määrän kuvaajia tuleekin käsitellä vain suuntaa antavina.

11.4.1 Pölyn määrä ja leikkausuran leveys vakioleikkausnopeudella

Kuvassa 81 on esitettyä vakioleikkausnopeudella leikkausurassa syntyvän pölyn määrä sekä leikkausuran leveys tehon kasvaessa.



Kuva 81. Leikkausurassa syntyvän paperipölyn määrä sekä leikkausuran leveys leikattaessa vakioleikkausnopeudella.

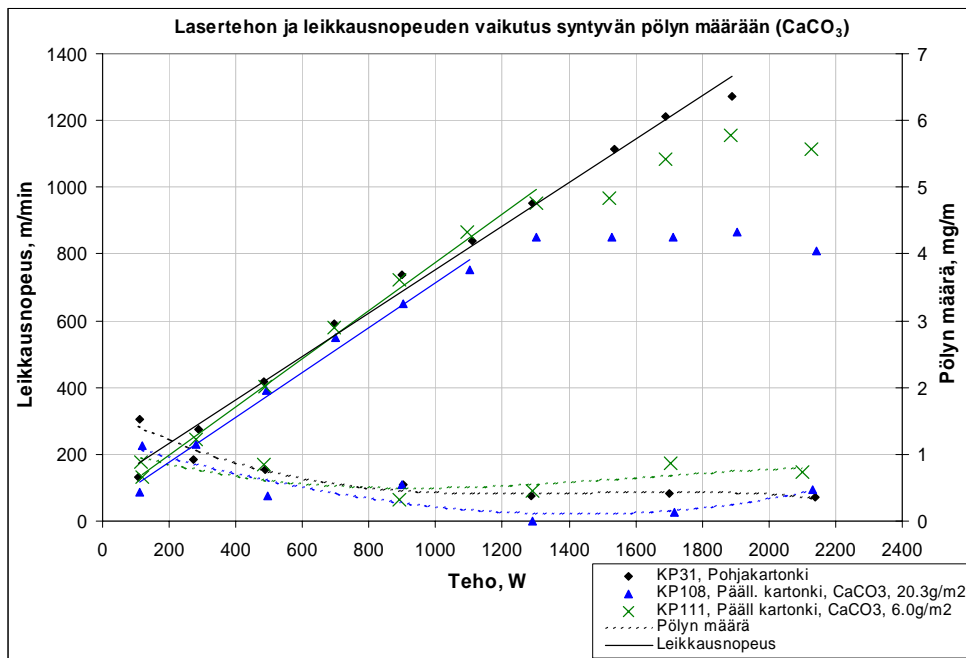
Leikkausuran leveys nousee tehon lisäyksen myötä logaritmisesti, kuten kappaleessa 11.3 jo todettiin. Syntyvän paperipölyn määrä näyttäisi olevan suoraan verrannollinen leikkausuran leveyteen päällystettyjä materiaaleja leikattaessa. Tämä johtuu oletettavasti siitä, että päällystyspigmentin määrä ei oleellisesti pienene leikkauksessa. Päällystepigmentti ei siis haihdu kuten selluloosa. Jonkin verran karbonaatista hajoaa suuremmilla tehoilla, mutta kalsiumkarbonaatin hajoamistuotteena on myös kalsiumoksidia joka jää suodattimeen. Päällystämättömän materiaalin pölyn määrä sen sijaan pysyy kutakuinkin vakiona leikkausuran leveyden lisääntyessä, koska selluloosa höyrystyy.

Lasertehoa ei saa tietyn leikkausnopeuden saavuttamiseksi syöttää liikaa. Ylimääräinen teho menee vain leikkausuran leventämiseen. Leikatut reunat alkavat todennäköisesti myös tummua liiasta tehosta.

Tulokset ovat samansuuntaisia muillakin pigmenteillä päällystetyillä kartongeilla. Nämä tulokset löytyvät liitteestä III.

11.4.2 Lasertehon ja leikkausnopeuden vaikutus syntyvän pölyn määrään

Kuvassa 82 leikkauksissa syntyvän pölyn määrä on suhteutettu käytettyyn lasertehoon ja leikkausnopeuteen. Jokainen kuvan piste on se maksimileikkausnopeus, jolla leikkaus vielä menee täysin näytteen läpi. Päälystyspigmenttinä kuvan 83 kokeissa oli kalsiumkarbonaatti.



Kuva 82. Leikkausurassa syntyvän pölyn määrä sekä leikkausuran leveys lasertehon ja leikkausnopeuden funktiona.

Pölyn määrä kasvaa jonkin verran, kun leikkausnopeuden lineaarinen kasvu tehon funktiona loppuu. Samalla leikkausuran leveys kasvaa, kuten aikaisemmissa kappaleissa on mainittu. Alhaisilla leikkausnopeuksilla ja tehoilla pölyn määrä on suurin. Tämä johtunee enemmän näytteenottotavasta kuin mistään laserparametreista. Pienemmillä leikkausnopeuksilla suodattimeen joutuu enemmän pölyä, koska leikkaustapahtuma kestää pitempään eli noin 200 ms. Suuremmilla tehoilla ja leikkausnopeuden kasvaessa leikkaustapahtuman kesto pienenee (20 – 100 ms), jolloin suodattimeen kertyy vähemmän pölyä. Toinen leikkausnopeuteen liittyvä tekijä on keskipakovoima. Kiekkosaman kierroslukua nostettaessa keskipakovoima

heittää osan pölystä leikkausurasta tangentin suuntaan ja vähemmän pölyä päätyy suodattimeen.

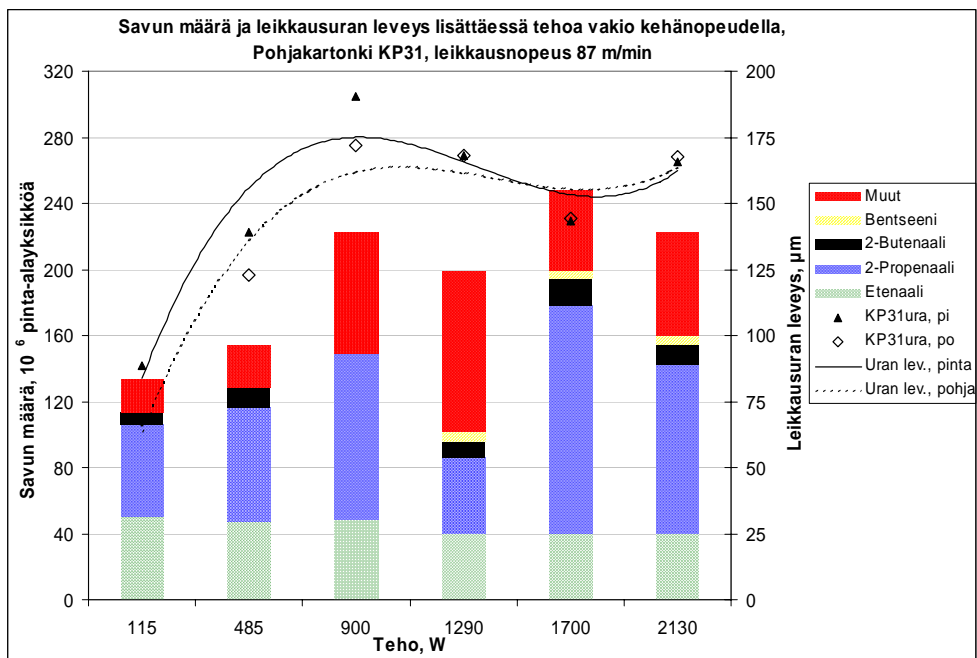
Muilla pigmenteillä päällystettyjen kartonkien pölytulokset löytyvät liitteestä IV.

11.5 Päällystettyjen kartonkien laserleikkauksessa syntyvät savut

Päällystettyjen kartonkien laserleikkauksessa syntyvien savujen analysoimiseksi pyrittiin sulkemaan leikkauspään alueen mahdollisimman tiiviisti. Näytteen ottamista varten leikattiin kutakin materiaalia yksi kiekko laserteoilla 9 – 100 % 18 %-yksikön välein. Leikkausnopeus pidettiin vakiona. Vakioleikkausnopeudeksi valittiin se maksimileikkausnopeus, jolla leikkaus meni täysin näytteen läpi 9 %:n eli noin 230 W:n laserteholla. Suljetusta tilasta leikkaussuuttimen alta pumpattiin syntyneitä savuja ioninvaihtohartsin läpi. Ioninvaihtohartsi analysoitiin Stora Enson Tutkimuskeskuksen massaspektrometrilla.

Paperinäytteillä ei tehty vastaavia kokeita näytteenoton hankaluuden vuoksi.

Kuvassa 83 on esitettyä päällystämättömän kartongin laserleikkauksessa syntyvien savujen määrää tehon funktiona vakioleikkausnopeudella. Seuraaviin kuviin on syntyneiden savujen komponenteista valittu vain neljä suurimman pitoisuuden yhdistettä. Lisäksi kuviin on yhdistetty syntyneen leikkausuran leveys.



Kuva 83. Päälystämättömän kartongin laserleikkauksessa syntyvien savujen määrä ja laatu. Leikkausuran pituus 43 cm.

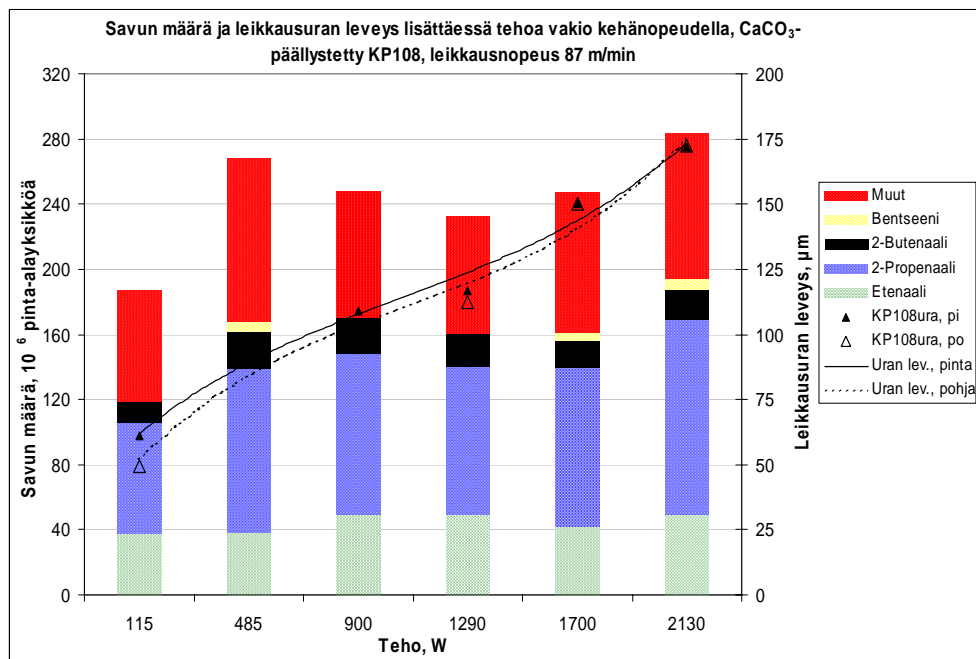
Kuten kirjallisuososan kappaleessa 8.2 on mainittu, ovat laserleikkauksessa syntyneet yhdisteet molekyylipainoltaan pieniä selluloosan pilkkoutumistuotteita. Massaspektrometrin tuloksista ei voi varmasti sanoa, ovatko yhdisteet juuri näissä kuvissa mainitut. Toisaalta Ramsayn ja Richardsonin /25/ tutkimuksissa havaittiin samoja yhdisteitä.

Syntyvien savujen kokonaismäärä on viitteellinen, koska kaikkea syntynyttä savua ei saatu talteen. Näytteenottokohdan rakenteesta johtuen raskaammat komponentit saattoivat mennä ohi näytteenottimesta. Ramsayn ja Richardsonin tutkimusten mukaan savukaasujen määrät pysyivät pitoisuuksiltaan työsuojelumääräysten antamien rajojen alapuolella.

Lasertehon lisääntyessä savun kokonaismäärä lisääntyy jonkin verran, mutta savun komponenttien määrät pysyvät suhteessa toisiinsa samoina.

Lähes kaikki savujen komponentit ovat jossain määrin myrkyllisiä, joten leikkauskohdan kunnollisesta ilmanvaihdosta on huolehdittava.

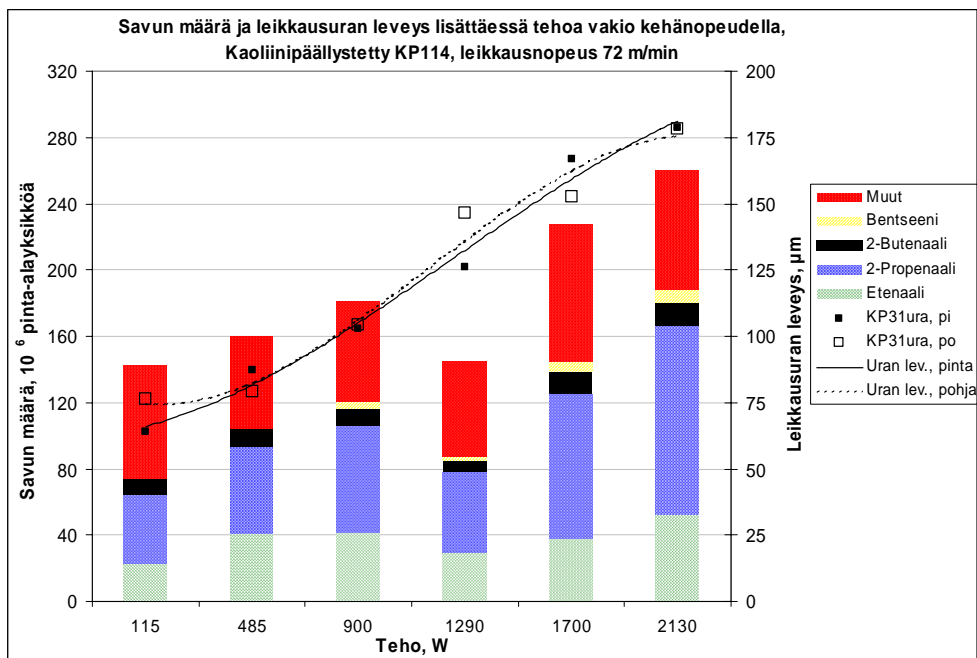
Kalsiumkarbonaatilla päällystetyn kartongin 108 savutulokset on esitetty kuvassa 84.



Kuva 84. Kalsiumkarbonaatilla päällystetyn kartongin laserleikkauksessa syntyvien savujen määrä ja laatu. Leikkausuran pituus 43 cm.

Myös kalsiumkarbonaatilla päällystetyn näytteen savun kokonaismäärä kasvaa tehon funktiona. Leikkausuran pituus oli näytteellä 108 sama kuin näytteellä 31. Selluloosan pilkkoutumistuotteiden määrä on kutakuinkin sama kuin näytteellä 31. Päällystys lisää jonkin verran ryhmään muut kuuluvien yhdisteiden määrää. Tähän joukkoon kuuluu lukematon määrä yhdisteitä, joiden laatua on vaikea todeta.

Kaoliinilla päällystetyn näytteen 114 savutulokset on esitettyä kuvassa 85.



Kuva 85. Kaoliinilla päällystetyn kartongin laserleikkauksessa syntyvien savujen määrä ja laatu. Leikkausuran pituus 36 cm.

Kaoliinilla päällystetyllä näytteellä syntyvien kaasujen määrä on pienempi kuin kalsiumkarbonaatilla päällystetyllä kartongilla. Tämä johtuu pienemmästä leikkausuran pituudesta. Leikkausuran lyhentyessä myös mittausvirheen mahdollisuus kasvaa. Savujen määrä lisääntyy leikkausuran pituuden ja leveyden lisääntyessä. Kaoliinipäällystys näyttäisi hieman pienentävän selluloosasta peräisin olevien yhdisteiden (etenaali ja 2-propenaali) määrää. Vastaavasti päällystys lisää ryhmän muut kokoa.

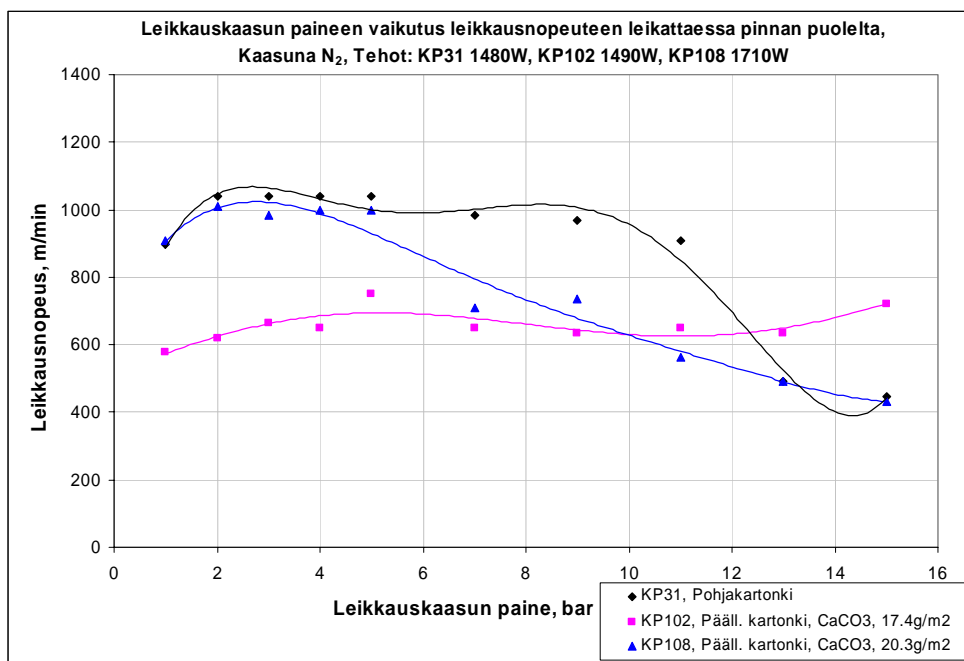
11.6 Prosessiparametrien vaikutus päällystettyjä materiaaleja leikattaessa

11.6.1 Leikkauskaasun paineen vaikutus leikkausnopeuteen

Aiemmissa kokeissa optimaaliseksi leikkauskaasun paineeksi on todettu 5 bar:ia. Seuraavissa kokeissa pyrittiin vaikuttamaan päällystetyillä materiaaleilla ilmenevään leikkausnopeuden nousun pysähtymiseen tehoa nostettaessa. Teho/nopeus-käyrältä valittiin kullekin materiaalille teho, joka on selvästi ongelmallisella alueella. Tällä teholla haettiin parasta leikkausnopeutta vaihtelemalla leikkauskaasun painetta välillä

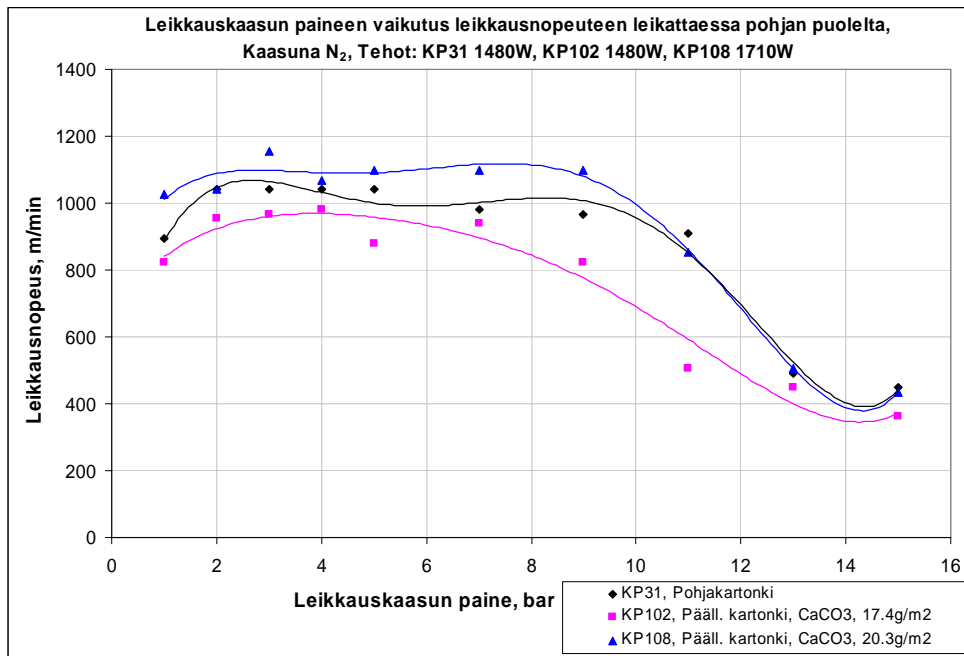
1– 5 bar:ia. Vähintään 1 bar:n paine on välttämätön linssin likaantumisen estämiseksi, joten sen alle ei painetta laskettu. Toisaalta on syytä tarkistaa linssin paineen kesto ennen kuin kokeilee korkeilla paineilla leikkaamista. Yksi linssi räjähti 15 bar:n painetta kokeiltaessa. Linssin sirpaleita oli jopa iskeytynyt kiinni leikkauspään yläpuolella olevaan peiliin. Laitteiston hajoamisriskin lisäksi kaasun kulutus lisääntyy kovemmilla paineilla.

Tulokset leikkauskaasun paineen vaikutuksesta leikkausnopeuteen on kuvissa 86 ja 87.



Kuva 86. Leikkauskaasun paineen vaikutus leikattaessa pinnan puolelta. Näytteen 31 leikkaamisessa käytetty teho oli 1480 W, näytteellä 102 teho oli 1490 W ja näytteellä 108 1710 W.

Kuvassa 86 olevia kolmea näytettä ei voi suoraan verrata toisiinsa, koska leikkauksessa käytetyt tehot olivat kullakin näytteellä hieman eritasoisia. Tuloksista voidaan kuitenkin nähdä, että aikaisemmissa tutkimuksissa /39/ valittu 5 bar:n paine on paras mahdollinen. Lisäämällä tai vähentämällä painetta ei saada merkittävää hyötyä. Leikkausnopeus jopa alenee, jos painetta nostetaan yli 10 bar:n. Materiaalin päällystämällä ja leikkauskaasun paineella ei näytä olevan mitään yhteyttä.



Kuva 87. Leikkauskaasun paineen vaikutus leikattaessa pohjan puolelta. Näytteen 31 leikkaamisessa käytetty teho oli 1480 W, näytteellä 102 teho oli 1480 W ja näytteellä 108 1710 W.

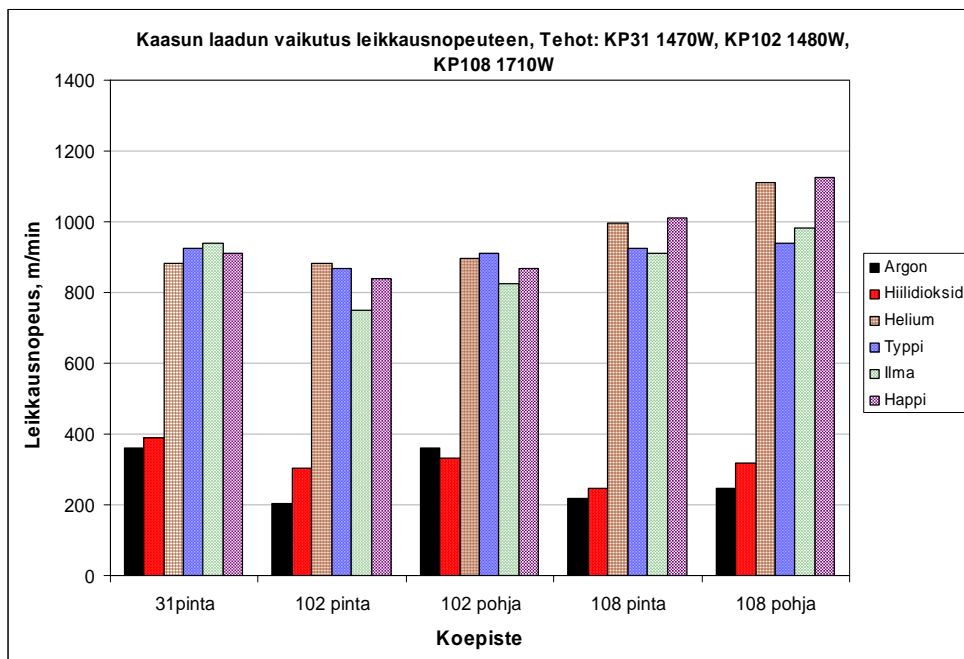
Tulokset leikkauskaasun vaikutuksesta leikkausnopeuteen ovat samansuuntaisia sekä näytteen pinnan, että pohjan puolelta leikattaessa. Noin 3 bar:n paine tarvitaan vähintään pitämään linssi puhtaana ja puhaltamaan leikkauspöly pois leikkausurasta. Yli 10 bar:n paineella leikkausnopeus alenee materiaalista riippumatta.

Erikoista näissä painekokeiluissa oli se, että 15 bar:n paineella leikattaessa näytettä 31 oli havaittavissa selvää liekin muodostusta leikkauskohdassa. Tämä liekin muodostuminen on aina aikaisemmin yhdistetty nopeuden laskuun leikattaessa karbonaatilla päällystettyjä materiaaleja suurella teholla. Näytteessä 31 ei ole päällystettä eikä täyteainetta. Sama ilmiö oli havaittavissa, kun leikkauskaasuna käytettiin argonia tai hiilidioksidia.

11.6.2 Leikkauskaasun laadun vaikutus leikkausnopeuteen

Erilaisia leikkauskaasuja kokeilemalla pyrittiin saamaan lisää leikkausnopeutta suurilla tehoilla leikattaessa. Leikkauskaasun paineena pidettiin 5 bar. Kokeissa leikattiin kolmea eri materiaalia (näytteet 31, 102 ja 108). Normaalisti käytettävän tyyppien lisäksi

leikkauskaasuna kokeiltiin argonia, hiilidioksidia, heliumia, paineilmaa ja happea. Kuvassa 88 olevia tuloksia ei voi verrata eri näytteiden kesken, koska jokainen näyte leikattiin hieman eri teholla. Tarkoituksena olikin selvittää kullekin näytteelle optimaalinen leikkauskaasu.



Kuva 88. Leikkauskaasun laadun vaikutus leikkausnopeuteen. Näytteen 31 leikkaamisessa käytetty teho oli 1470 W, näytteellä 102 1480 W ja näytteellä 108 teho oli 1710 W.

Näiden tulosten perusteella mikään leikkauskaasu ei erottunut selvästi edukseen. Karbonaatilla päällystetyille näytteille 102 ja 108 parhaat leikkauskaasut ovat näiden tulosten perusteella happi ja helium. Saavutettavat hyödyt ovat kuitenkin varsin marginaalisia, joten leikkauskaasun hintaa lienee syytä harkita jos ei tarvitse aivan ehdottomasti maksimaalisia leikkausnopeuksia ja tehoja. Silmämääräisesti katsoen leikkausuran laatu oli yhtä hyvä heliumilla, typellä, ilmalla ja hapella.

Argonilla ja hiilidioksidilla saavutettava leikkausnopeus oli todella huono. Myös leikatun reunan laatu oli silmämääräisestikin arvioiden varsin huono ja liekinmuodostus leikkausurassa oli voimakasta kaikilla materiaaleilla. Hiilidioksidi ei sovellu CO₂-laserin leikkauskaasuksi, koska se mahdollisesti absorboi sädettä 10,6 μm:n aallonpituudella.

Comment [r1]: Osaako joku arvata mitä Argonin tapauksessa käy?

11.6.3 Sivupuhalluksen vaikutus leikkausnopeuteen

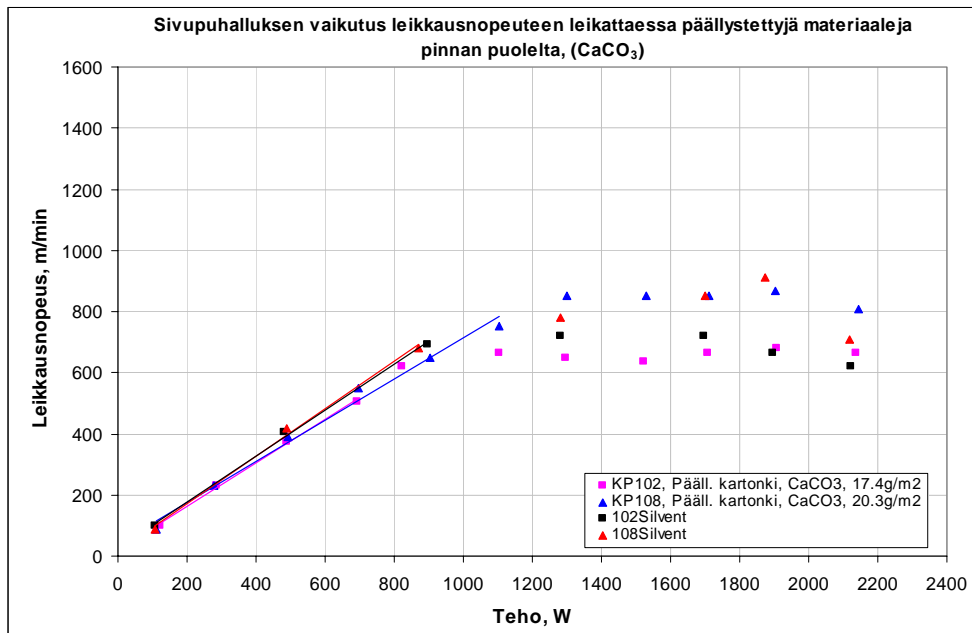
Yritimme nostaa maksimileikkausnopeutta asentamalla leikkauspään alle ylimääräisen sivupuhaltimen. Ajatuksena oli, että puhaltamalla syntyvän leikkausuran suuntaisesti voitaisiin leikkausurasta tehokkaammin poistaa siinä syntyvää leikkauspölyä ja -savua. Leikkauspölyn ja leikkauksessa muodostuvan hiilidioksidin puolestaan arveltiin estävän osaltaan leikkausnopeuden nousua suurilla tehoilla leikattaessa. Sivupuhalluslaitteena käytettiin Silvent ilmaveistä (kuva 89). Sivupuhaltimella syötettiin syntyvän leikkausuran suuntaisesti paineilmaa 3 bar:n paineella. Leikkaukset tehtiin näytteille 31, 102 ja 108 noin 2 kW:n tehoilla.

Kiekkoa paikallaan pitävä kita poistettiin ilman virtauksen parantamiseksi leikkausurassa. Leikattavan kiekon reuna pysyi kuitenkin paikallaan hieman yläviistosta suunnatulla sivupuhalluksella.



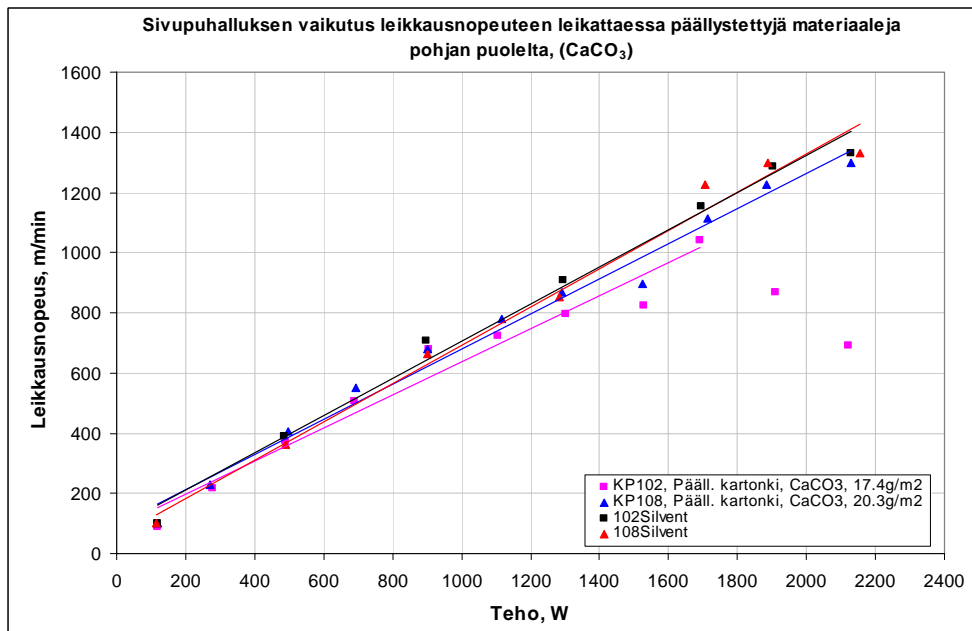
Kuva 89. Leikkauspään alle asennettu Silvent sivupuhallussuutin.

Kokeen tulokset on esitettyä kuvissa 90 ja 91.



Kuva 90. Silvent sivupuhallussuuttimen vaikutus leikkausnopeuteen leikattaessa päällystettyjä materiaaleja pinnan puolelta.

Kuvan 90 perusteella voidaan todeta, että Silvent-sivupuhallussuuttimella ei ollut leikkaukseen mitään vaikutusta leikattaessa päällystetyn pinnan puolelta.



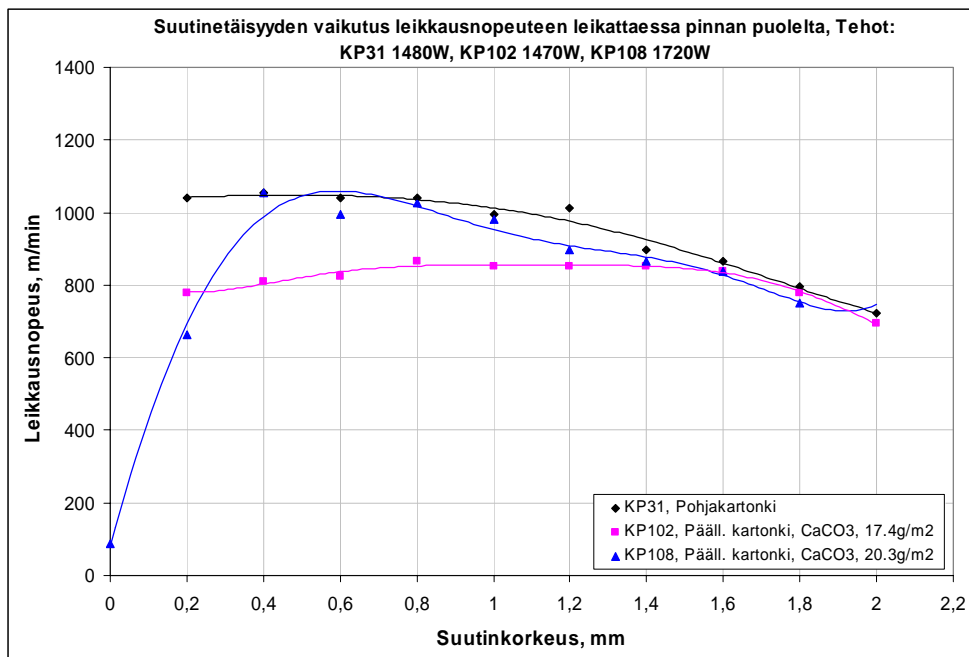
Kuva 91. Silvent sivupuhallussuuttimen vaikutus leikkausnopeuteen leikattaessa päällystettyjä materiaaleja pohjan puolelta.

Pohjan puolelta leikattaessa saatiin karbonaatilla päällystetylle näytteelle 102 lisää leikkausnopeutta suurella teholla leikattaessa. Muilla näytteillä tehon vaikutus leikkausnopeuteen on muutenkin suoraan verrannollinen leikattaessa pohjan puolelta, joten sivupuhalluksen vaikutusta tässä tapauksessa on vaikea arvioida.

11.6.4 Leikkaussuuttimen aseman vaikutus leikkausnopeuteen

Muuttamalla leikkaussuuttimen etäisyyttä leikattavan materiaalin pintaan nähden pyrittiin lisäämään leikkausnopeutta suurella teholla leikattaessa. Leikkaussuuttimen kärjen paikkaa nostettiin tasosta nolla (materiaalin pinnassa kiinni) lähtien, 0,2 mm:n välein, aina 2 mm:n korkeuteen asti. Ensimmäisessä kokeilussa kuitenkin huomattiin, että leikkaussuuttimen kärjen on oltava vähintään 0,2 mm:n etäisyydellä materiaalin pinnasta. Leikkausnopeus laskee merkittävästi ja linssin likaantumisen riski kasvaa huomattavasti, jos leikkaussuutin koskettaa materiaalin pintaa.

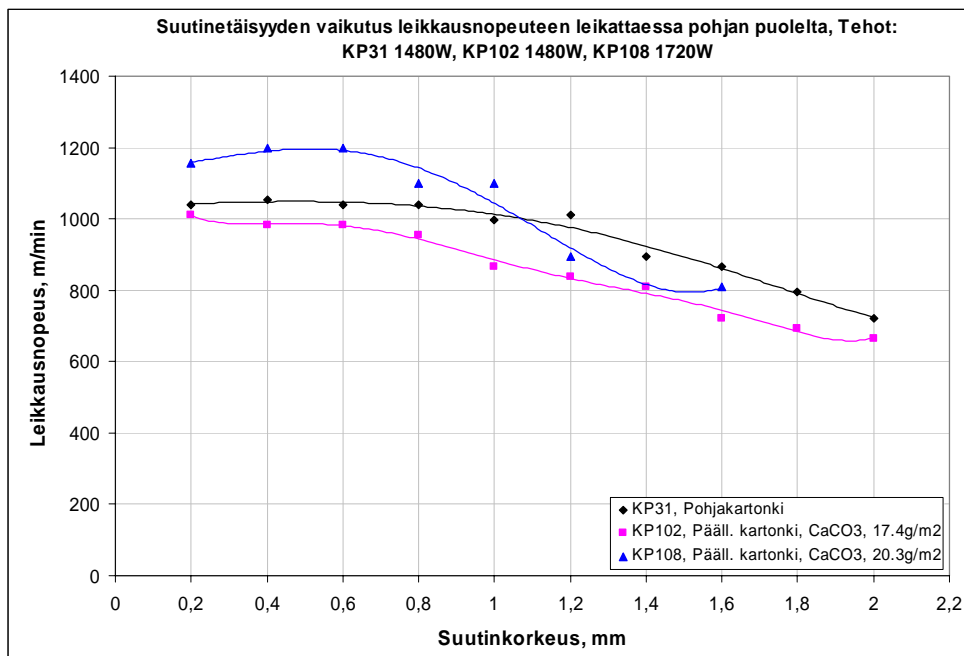
Tulokset leikkaussuuttimen paikan merkityksestä leikkausnopeuteen on esitetty kuvissa 92 ja 93.



Kuva 92. Suuttimen paikan vaikutus leikkausnopeuteen leikattaessa pinnan puolelta. Näytteen 31 leikkaamisessa käytetty teho oli 1480 W, näytteellä 102 teho oli 1470 W ja näytteellä 108 1720 W.

Pinnan puolelta leikattaessa karbonaatilla päällystetylle materiaalille 108 saatiin lisää leikkausnopeutta nostamalla suutin 0,4 – 1,0 mm:n etäisyydellä materiaalin pinnasta. Muilla materiaaleilla ei havaittu merkittävää hyötyä suuttimen asemaa nostamalla. Noin 1 mm:n jälkeen leikkausnopeus alkoi laskea kaikilla materiaaleilla.

Suuttimen etäisyyttä 0mm kokeiltiin vain kerran, sillä alhaisen leikkausnopeuden lisäksi kartonki oli syttyä palamaan ja kartongista roiskuva materiaali pilasi linssin.



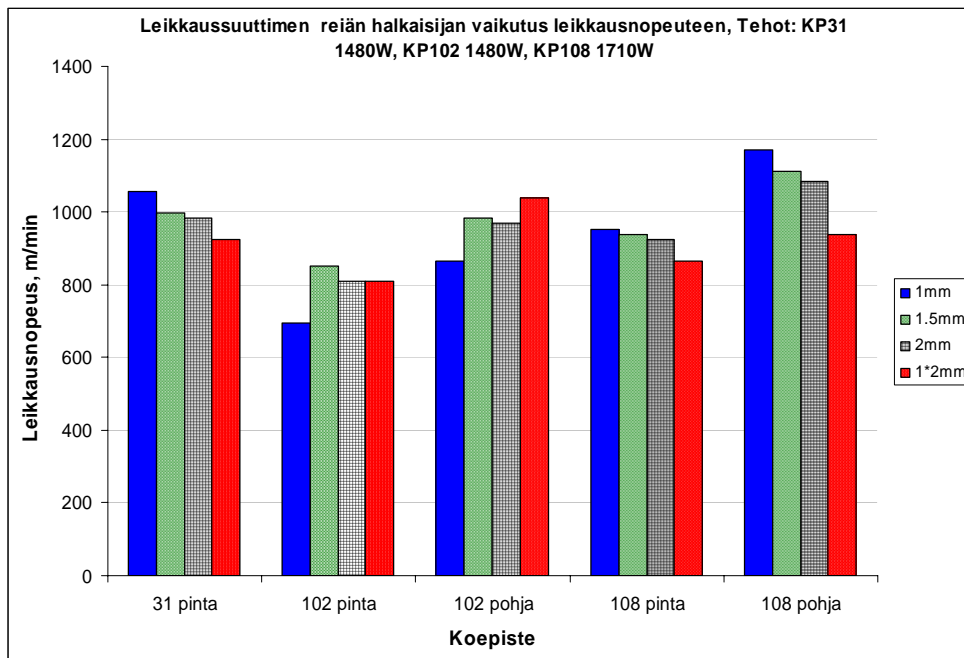
Kuva 93. Suuttimen paikan vaikutus leikkausnopeuteen leikattaessa pohjan puolelta. Näytteen 31 leikkaamisessa käytetty teho oli 1480 W, näytteellä 102 teho oli 1480 W ja näytteellä 108 1720 W.

Myös pohjan puolelta leikattaessa näytteen 108 leikkausnopeus nousee hieman suutinta nostettaessa. Paras leikkausnopeus näytteelle 108 saadaan 0,4 – 0,6 mm etäisyydellä. Näytteillä 31 ja 102 leikkausnopeutta ei saatu nostettua suutinta nostamalla. Tässäkin tapauksessa leikkausnopeus alkaa laskea noin 1 mm:n suutinetäisyydellä.

Tehonlasku yli 1 mm:n suutin korkeuksilla saattaa johtua siitä, että lasersäde osuu reunoiltaan suuttimen seinämiin.

11.6.5 Leikkaussuuttimen reiän halkaisijan vaikutus leikkausnopeuteen

Leikkausnopeutta pyrittiin lisäämään leikkaussuuttimen reiän halkaisijaa muuttamalla. Suuttimet, joiden reiän halkaisijat olivat 1 mm, 1,5 mm ja 2 mm, olivat teollisesti valmistettuja. Suutin 1*2 mm:n aukolla tehtiin itse poraamalla ensin 1 mm:n reikä keskelle suutinta ja levittämällä sitten reikää 2 mm säteen suuntaisesti. Tämä suutin asetettiin leikkauspäähän siten, että suuttimen reikä oli pituussuunnassa syntyvän leikkausuran suuntainen. Leikkauskaasuna käytettiin typpeä, jota syötettiin 5 bar:n paineella.



Kuva 94. Leikkaussuuttimen reiän halkaisijan vaikutus leikkausnopeuteen. Näytteet 31 ja 102 leikattiin 1480 W:n teholla ja näyte 108 1710 W:n teholla.

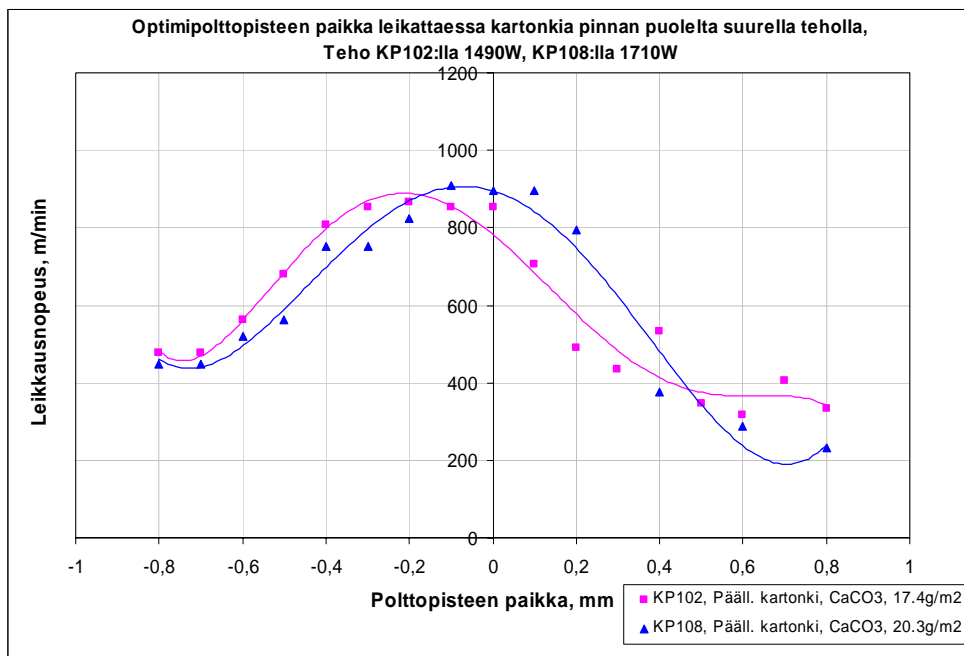
Näytteillä 31 ja 108 leikkaussuuttimen reiän halkaisijan kasvattaminen alentaa leikkausnopeutta niin pinta- kuin pohjapuoleltakin leikattaessa. Näytteellä 102 käy päinvastoin.

11.6.6 Polttopisteen paikka leikattaessa suurella teholla

Leikkausnopeuden laskun tietyillä materiaaleilla arveltiin johtuvan ainakin osittain siitä, että paras mahdollinen polttopisteen paikka on jossakin toisessa kohdassa suurella

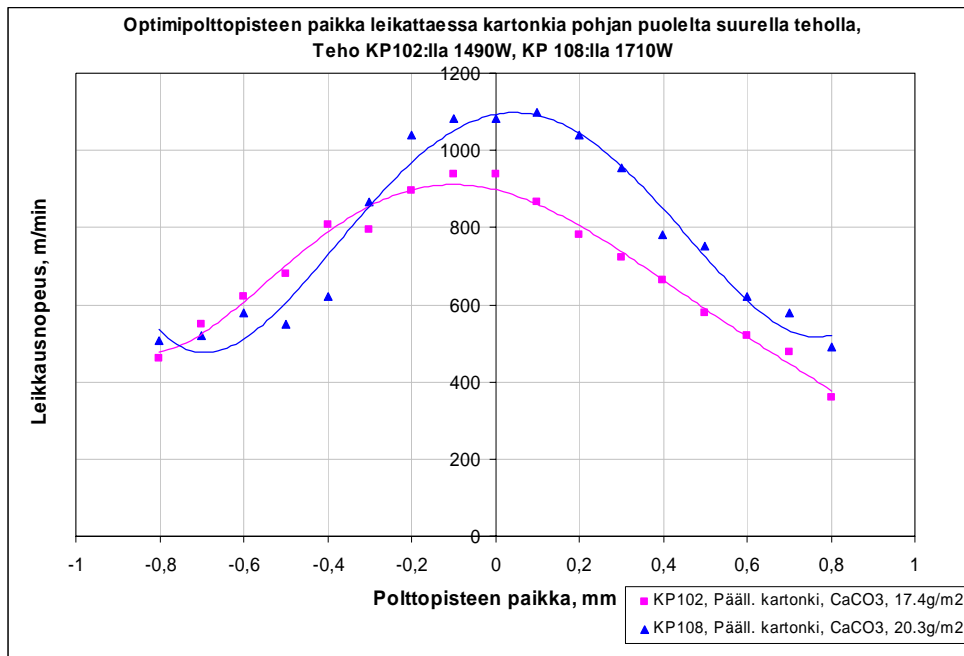
teholla leikattaessa. Suurella teholla leikattaessa 0,1 mm:n siirtymä polttopisteen paikassa saattaa nostaa tai laskea leikkausnopeutta 10 – 20 %. Tulokset tehon vaikutuksesta polttopisteen paikkaan on esitettyä kuvassa 96.

Kuvassa 95 olevia näytteiden 102 ja 108 tuloksia ei voi suoraan verrata keskenään, koska näytteiden leikkaamiseen on käytetty eri tehoja. Näytteen 102 leikkaamiseen on käytetty tehoa 1490 W ja näytteellä 108 1710 W.



Kuva 95. Optimipolttopisteen paikka leikattaessa kartonkia pinnan puolelta suurella teholla. Leikattaessa näytettä 102 teho oli 1490 W ja näytteellä 108 1710 W.

Kuvien 63 ja 64 perusteella näytteiden 102 ja 108 optimi polttopisteen paikat ovat kohdassa 0 mm eli näytteen pinnassa. Kuvan 95 perusteella näytteen 102 polttopisteen paikka on siirtynyt noin 0,2 mm näytteen pinnan alapuolelle leikattaessa suurella teholla. Tämä siirtymä saattaa kuitenkin olla vain satunnaista vaihtelua, koska toisen lähes samanlaisen näytteen 108 optimi polttopisteen paikka on pysynyt samassa kohdassa leikattaessa 1710 W:n teholla kuin leikattaessa 280 W:n teholla. Toisaalta polttopisteen paikka on siirtynyt näytteen sisään päin myös pohjan puolelta (kuva 96) leikattaessa joskaan ei yhtä paljon.



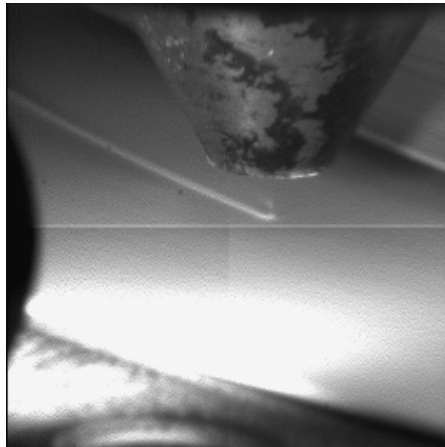
Kuva 96. Optimipolttopisteen paikka leikattaessa kartonkia pohjan puolelta suurella teholla. Leikattaessa näytettä 102 teho oli 1490 W ja näytteellä 108 1710 W.

11.7 Leikkaustapahtuman kuvaaminen suurnopeuskameralla

Tähän diplomityöhön liittyvissä aikaisemmissa tutkimuksissa [39] havaittiin, että päällystettyjä kartonkeja leikattaessa lasertehon nosto ei enää nosta leikkausnopeutta tietyn tehotason yläpuolella (ks. kpl 4.5.2 ja 11). Tähän leikkausnopeuden nousun pysähtymiseen yhdistettiin leikkauskohdassa selvästi havaittava valon välähdys. Tämän välähdyksen arveltiin aiheuttavan leikatun reunan värjäytymistä.

Leikkaustapahtuman ongelmien selvittämiseksi leikkauskohtaa kuvattiin HiSIS 2000 suurnopeuskameralla. Kamera kykenee ottamaan 2000 kuvaa sekunnissa, mutta näissä kuvauksissa otettiin vain 1000 kuvaa sekunnissa.

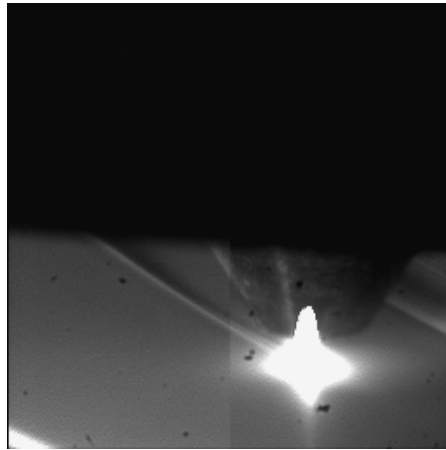
Seuraavissa kuvissa näkyvä kartiomainen kappale on leikkaussuuttimen kärki. Leikkaukset on suoritettu kiekkoasemalla ja leikkausura syntyy kuvissa vasemmalle. Kaikissa kuvissa laserteho on noin 2150 W ja leikkausnopeus 870 m/min. Leikkauskaasun paine on 5 bar ja leikkaussuutin on kuvausteknisistä syistä hieman normaalia ylempänä eli noin 1 mm päässä näytteen pinnasta.



Kuva 97. HiSIS 2000 suurnopeuskameralla kuvattu päällystämättömän näytteen 31 laserleikkaus. Leikkauksessa laserteho oli 2150 W ja leikkauksenopeus 870 m/min. Leikkaussuutin oli noin 1 mm etäisyydellä näytteen pinnasta ja leikkauskaasun paine oli 5 bar.

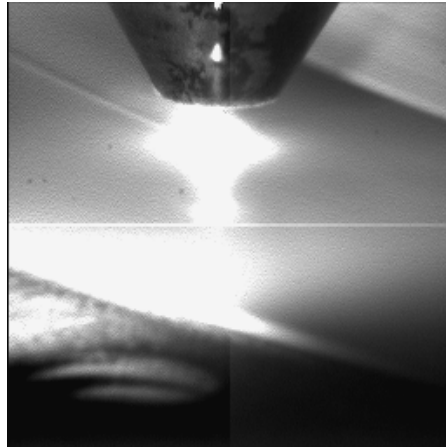
Päällystämätön näyte 31 leikkautui erittäin siististi. Minkäänlaista liekin muodostusta ei ollut havaittavissa ja leikattu reuna oli silmämääräisesti katsoen siisti ja värjäntymätön. Leikkaus suoritettiin vertailun ja kuvauksen vuoksi samalla nopeudella päällystettyjen näytteiden kanssa, vaikka näytettä 31 olisi voinut tällä teholla leikata nopeamminkin.

Normaaleilla laserparametreilla leikattaessa näytteellä 31 ei havaittu liekin muodostusta, mutta nostamalla kaasun painetta noin 15 bar:iin tai käyttämällä leikkauskaasuna argonia tai hiilidioksidia muodostuu myös näytteen 31 leikkauskohtaan liekki. Argonilla ja hiilidioksidilla kysymys on todennäköisesti siitä, että nämä kaasut absorboivat CO₂-laserin sädettä. Absorboidessaan energiaa kaasun atomit virittyvät ja viritystilän laukeaminen näkyy valona.



Kuva 98. HiSIS 2000 suurnopeuskameralla kuvattu karbonaattipäällysteisen näytteen 102 laserleikkaus. Leikkauksessa lasertehto oli 2150 W ja leikkausnopeus 870 m/min. Leikkaussuutin oli noin 1 mm etäisyydellä näytteen pinnasta ja leikkauskaasun paine oli 5 bar.

Karbonaattipäällysteisellä näytteellä 102 liekin muodostus oli kaikilla tehoilla selvää. Liekin ollessa tarpeeksi voimakas alkoivat leikatut reunat jo selvästi värjäytyä.



Kuva 99. HiSIS 2000 suurnopeuskameralla kuvattu kaoliinipäällysteisen näytteen 114 laserleikkaus. Leikkauksessa lasertehto oli 2150 W ja leikkausnopeus 870 m/min. Leikkaussuutin oli noin 1 mm etäisyydellä näytteen pinnasta ja leikkauskaasun paine oli 5 bar.

Myös kaoliinipäällysteisellä näytteellä 114 havaittiin liekin muodostusta kaikilla tehoilla. Tämä oli hieman yllättävää, sillä liekin muodostus yhdistettiin aikaisemmin lähinnä karbonaattipäällysteisiin näytteisiin ja leikkausnopeuden nousun rajoittumiseen. Kaoliini todennäköisesti absorboi CO₂-laserin sädettä sen verran, että se alkaa hehkua. Karbonaattipäällysteisillä materiaaleilla liekki syntyy kalsiumkarbonaatin hajoamisesta

kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Hiilidioksidi absorboi edelleen CO₂-laserin sädettä ja atomien virittyminen ja purkautuminen näkyy valona.

12 VIRHEARVIOITA

Keskeisiä tekijöitä tulosten kannalta näissä kokeissa olivat polttopisteen paikan määrittäminen, lasertehon mittaaminen, leikkausnopeuden mittaaminen sekä leikkausuran visuaalinen arviointi. Paperi ja kartonki ovat materiaaleina aina jonkin verran epähomogeenisia, mutta sillä ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta tulosten kannalta.

Käytetyllä koelaitteistolla lasertehon epätarkkuus oli vain muutamien prosenttien luokkaa. Samoin leikkausnopeuden mittaustulokset olivat luotettavuudeltaan vähintään samaa luokkaa.

Polttopisteen paikan määrittämisessä mitattavat etäisyydet olivat pieniä, joten virheen määrä suhteessa leikattavan materiaalin paksuuteen saattoi olla merkittävä. Toisaalta kokeissa käytetyllä optiikalla polttopisteen syvyysterävyys on noin 0,38 mm. Tämä syvyysterävyys riittää kompensoimaan alle 0,1 mm:n virheet polttopisteen paikassa varsinkin kun leikattavat materiaalit näissä kokeissa olivat paksuudeltaan maksimissaan 330 µm. Jos polttopisteen paikka muuttuu ±0,2 mm optimi kohdastaan, muuttuu leikkausnopeus vain noin 10 %.

Kartonkiarkin ei pitäisi pystyä liikkumaan merkittävästi kiekkoasemassa lasersäteen suunnassa. Papereilla asia voi olla toisin. Rumpuaseman rakenteesta johtuen keskipakovoima saattoi nostaa paperia rummun pinnasta ja rummun keskellä näytteen suuntaisesti kulkevasta urasta näytettä vasten puhaltanut ilmavirta tehosti nostovaikutusta samasta syystä.

Enemmän virhettä maksimi leikkausnopeuden määrittämisessä aiheuttaakin leikkauksen onnistumisen silmämääräinen tarkastelu. Tietyllä teholla maksimileikkausnopeus oli se nopeus, jolla leikkaus meni täysin näytteen läpi. Täysin läpi tarkoittaa sitä, että leikatut reunat olivat kokonaan irti toisistaan ja

leikkausreunoissa ei näkynyt silmin katsomalla irtonaisia kuituja tai kuitukimppuja. Joskus leikkausreunoissa saattoi näkyä vain yksi tai kaksi kuitua hyvinkin laajalla leikkausnopeusalueella. Jos yksi tai kaksi kuitua leikatussa reunassa olisi ollut hyväksyttävä tulos, leikkausnopeuden tulos olisi voinut olla tällöin suurempi. Useimmiten raja onnistuneen leikkauksen ja vain osittaisen läpimenon välillä oli kuitenkin varsin selvä.

Paperin ja kartongin laserleikkauksissa syntyvän pölyn määrää tutkittiin suodattamalla syntyneitä pölyjä nitroselluloosa- ja polykarbonaattisuodattimiin ja punnitsemalla suodattimet. Leikkauspään aluetta ei kuitenkaan saatu täysin suljettua ja kaikki pölyjä ei siten saatu jäämään suodattimeen. Pölyn määrän tulokset ovatkin enemmän suuntaa antavia kuin että niistä voitaisiin laskea syntyvän pölyn todellista määrää.

Syntyvien savujen määrää ja laatua pyrittiin selvittämään samaan tapaan kuin pölyillä. Tässäkin tapauksessa leikkauspään aluetta ei pystytty täysin sulkemaan, joten ioninvaihtohartsin päätyi vain osa leikkauksessa syntyneistä savuista. Tietyillä laserparametreilla syntyvän savun kokonaismäärää ei siis näiden kokeiden avulla pystytty selvittämään, eikä se tässä tapauksessa ollut tarpeenkaan. Savujen näytteenottoaika oli välittömästi leikkaussuuttimen alapuolella. Leikkaussuuttimen alapuolella oli myös osa kiekkoaseman tukirungosta. Tämän tukirungon putken pohjalle saattoi vajota syntyneiden savujen raskaammat jakeet. Jos näytteenottoputkeen kuitenkin saatiin kerättyä myös raskaammat jakeet, olivat tulokset syntyneiden savujen komponenteista ja niiden keskinäisistä suhteista varsin luotettavia. Stora Enson Tutkimuskeskuksen kaasukromatografi ei kyennyt erottamaan savunäytteistä kaikkein keveimpiä jakeita kuten hiilidioksidia.

13 JOHTOPÄÄTÖKSET

Päällystettyjen kartonkien ja papereiden laserleikkaus on näiden kokeiden perusteella varsin ongelmaton, jos kovin suuret lasertehot tai leikkausnopeudet eivät ole tarpeen. Kaikkiin tämä hetken kartongin muotoonleikkaamissovelluksiin löytyy sopiva laserteho ja leikkausnopeus. Leikkausnopeus on alle 1100 W:n lasertehoilla lineaarisesti

riippuvainen käytetystä lasertehosta, kuten kirjallisuudessa oli mainittu. Tällä 1100 W:n teholla päästään jo yli 600 m/min leikkausnopeuksiin, mutta suuremmatkin leikkausnopeudet ovat mahdollisia. Leikkauksen jälki oli kaikilla tutkituilla materiaaleilla siistiä ja suhteellisen pölytöntä. Leikatut reunat eivät värjäytyneet ainakaan silmin nähden kunhan laserteho oli sovitettu tarvittavaan leikkausnopeuteen. Mittausten mukaan reunan värjäytyminen oli varsin vähäistä (2-4 prosenttiyksikköä), vaikka leikkauksen onnistumisen kannalta tehoa oli reilusti ylimäärin.

Jopa päällystettyjen kartonkien ja papereiden pituusleikkaus voisi olla näiden tulosten perusteella mahdollista. Pituusleikkureiden nopeuksien saavuttaminen on mahdollista lähes kaikilla tutkituilla materiaaleilla.

Karbonaattipäällystys on kuitenkin äärimmäisissä leikkausnopeuksissa hieman ongelmallista. Lasersäteen vaikutuksesta hajoava kalsiumkarbonaatti ja reaktiotuotteena muodostuva hiilidioksidi absorboivat CO₂-laserin lähettämää aallonpituutta, jolloin leikkausnopeus asettuu leikattavasta materiaalista riippuvaiselle maksimitasolle. Leikkausnopeus karbonaattipäällysteisillä kartongeilla rajoittuu päällysteen puolelta leikattaessa joillakin materiaaleilla 600 m/min:ssa, eikä tehon lisääminen tämän jälkeen enää nosta leikkausnopeutta. Mitä enemmän päällystepigmenttiä kartongin pinnassa on, sitä pienemmäksi leikkausnopeuden maksimiarvo jää. Mahdollisesti jollakin riittävän suurella lasertehon arvolla leikkausnopeus kääntyy jälleen nousuun.

Leikkausnopeus alenee päällystykseen määrän lisääntyessä karbonaatilla, kaoliinilla ja näiden seoksella päällystetyillä kartongeilla ja papereilla verrattuna vastaavan neliömassan omaaviin päällystämättömiin materiaaleihin. Leikkausnopeuden alenema on päällystyspigmentistä ja sen määrästä riippuen 5 – 20 % päällystämättömään materiaaliin verrattuna. Tämä teho/nopeus-käyrän lineaarisen osan kulmakertoimen pieneminen johtuu siitä, että kaikki päällystyspigmentit sirottavat, heijastavat ja absorboivat lasersädettä jonkin verran. Mitä enemmän päällystettä on, sitä pienemmäksi saavutettava maksimileikkausnopeus jää tietyllä teholla. On syytä pitää

mielessä, että paperin ja kartongin täyteaineilla on laserleikkaukseen samanlainen vaikutus.

Leikkausnopeuden aleneminen on huomattavampaa päällystetyltä puolelta leikattaessa. Jos laserleikattavaksi ajatellusta kartongista tai paperista on päällystetty vain toinen puoli ja jos suuret leikkausnopeudet ovat tarpeen, kannattaa materiaali aina leikata päällystämättömältä puolelta. Leikkauksen jälki oli silmämääräisesti tarkastellen samanlaista sekä pinnan, että pohjan puolelta leikattaessa.

Polttopisteen optimipaikkaan paperin ja kartongin päällystämällä ei ole merkitystä. Paras asema polttopisteelle on paperilla ja kartongilla materiaalin pinnassa tai hieman sen yläpuolella. Suurella teholla leikattaessa polttopisteen asema saattaa hieman muuttua, mutta pysyy kuitenkin välillä $\pm 0,2$ mm. Tällä välillä polttopisteen aseman muutokset vaikuttavat leikkausnopeuteen vain noin 10 % suuntaan tai toiseen.

Päällystettyjen kartonkien ja papereiden laserleikkauksessa syntyvien pölyn ja savujen kokonaismäärää ei saatu näiden kokeiden perusteella selvitettyä, eikä siihen toisaalta ollut tarvettakaan. Kuitenkin tietyistä suuntia antavista määristä voidaan olla varmoja. Päällystetyillä kartongeilla pölyn määrä on suoraan verrannollinen syntyvän leikkausuran pituuteen ja leveyteen. Lisättäessä lasertehoa vakioleikkausnopeudella pölyn määrä lisääntyy päällystetyillä kartongeilla, mutta ei päällystämättömillä. Tämä johtuu siitä, että päällystämättömien kartonkien selluloosaa haihtuu samassa suhteessa tehon noston ja leikkausuran levenemisen kanssa. Päällystetyillä kartongeilla pölynä mitattavaa päällystyspigmenttiä jää enemmän jäljelle samoissa olosuhteissa.

Teho/nopeus-suoralla pölyn määrä on suurempi pienemmällä lasertehoilla ja leikkausnopeuksilla. Pölyn määrä asettuu alkua pienemmälle vakiotasolle leikkausnopeutta ja tehoa nostettaessa, jos leikkausnopeus on suoraan verrannollinen käytettyyn lasertehoon. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että kiekkoasemaa pyöritettäessä keskipakovoima ohjaa syntyvän pölyn pois näytteenottokohdasta. Muodostuvan pölyn kokonaismäärää ei siis tiedetä, mutta on luultavaa että sitä muodostuu leikkausuran leveydestä ja materiaalista riippuen jokin vakiomäärä.

Laserleikkauksissa muodostuvat savut ovat valtaosaltaan selluloosasta peräisin olevia molekyylipainoltaan pieniä yhdisteitä. Ylimääräinen laserteho leikkausnopeuteen nähden lisää savujen määrää. Lähes kaikki syntyneet yhdisteet ovat joko myrkyllisiä tai karsinogeenisia, joten leikkausuran alueen ilmanvaihdosta on huolehdittava. Savujen kokonaismäärää oli näiden kokeiden perusteella mahdotonta määrittää, mutta todennäköisesti kokonaispitoisuudet ovat kuitenkin työsuojeluraja-arvojen alapuolella. Ramsayn ja Richardsonin /25/ tutkimukset tukevat tätä olettamusta.

Prosessiparametreja muuttellessa ei saatu aikaan merkittävää parannusta tähän työhön liittyneissä aikaisemmissa tutkimuksissa hyviksi havaittuihin nähden. Näillä kokeilla oli lähinnä tarkoitus päästä yli leikkausnopeuskynnyksestä, joka kalsiumkarbonaatilla päällystetyillä materiaaleilla tuli vastaan tietyllä laserteholla leikattaessa. Tämä ei kuitenkaan täysin onnistunut. Muuttamalla joitakin prosessiparametreja voitiin saavuttaa 10 – 20 %:n parannuksia leikkausnopeuteen. Saattaa olla, että näitä pienen parannuksen tuottavia prosessiparametreja yhdistelemällä voitaisiin saavuttaa kertaantuvia hyötyjä. Varsinkin kaikki leikkauskaasuun liittyvät parametrit voisivat olla yhdistelemisen arvoisia. Näitä ovat kaasun laatu, kaasun paine, suuttimen halkaisija, ja leikkaussuuttimen asema materiaaliin nähden.

14 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Tulosten tarkastelussa ja johtopäätöksissä mainittiin, että leikkausnopeuden rajoittuminen tietylle lasertehosta riippumattomalle maksimitasolle johtuu pääasiassa kalsiumkarbonaatin hajoamisesta ja sen reaktiotuotteista. Tämä on kuitenkin vain todennäköinen syy, hypoteesi. Lisäkokeita onkin tehtävä tämän hypoteesin todistamiseksi.

Osittain kalsiumkarbonaatin hajoamisen todistamiseen liittyen päällystettyjen kartonkien ja papereiden laserleikkauksessa syntyvien pölyjen ja savujen näytteenottoa on jotenkin parannettava. Pölyjen ja savujen näytteenottomenetelmiä parantamalla

voitaisiin tehdä tarkempia arvioita laserleikkauksessa syntyvien pölyjen ja savujen absoluuttisista määristä.

Erilaisia laserparametreja kokeiltiin pelkästään päällystämättömälle ja kalsiumkarbonaatilla päällystetyille kartongille. Nämä kokeet olisi ehkä syytä suorittaa myös kaoliinilla sekä kaoliinin ja karbonaatin seoksella päällystetyille kartongeille. Lisäksi erilaisten laserparametrien yhdistelmiä olisi syytä kokeilla.

Näissä kokeissa leikattujen kartonkien leikkausreunat olivat suhteellisen suoria. Leikattavan materiaalin paksuuden lisääntyessä fokusoivan optiikan geometria asettaa kuitenkin rajoituksia leikkausreunan suoruudelle. Niin sanotulla Dual Fokus linssillä voitaisiin ehkä leikata paksumpia kartonkeja suurempaan ja nopeammin, koska tällaisen linssityypin syvyysterävyys on suhteellisen pitkä. Pitkästä syvyysterävyydestä on myös se hyöty, että polttopisteen paikan materiaaliin nähden ei tarvitse olla yhtä tarkasti kohdallaan kuin tavallisella linssillä.

VIITELUETTELO:

1. Bellis, M., Laser History, viitattu 16.12.2003, saatavissa: <http://inventors.about.com/library/inventors/bllaser.htm>
2. Laser stars, Optical Laser, viitattu 16.12.2003, saatavissa: <http://home.achilles.net/~jtalbot/history/ruby.html>
3. Pagewise, Inc., A Technical History of the Laser, viitattu 16.12.2003, saatavissa: http://ksks.essortment.com/historyoflaser_rsn.htm
4. Linkoaho, M., Valjakka, J., *Valo-oppi*. Otakustantamo, 1979, s. 71-73.
5. Steen, W.M., *Laser Material Processing*. Springer-Verlag London Limited, 3. painos, 2003, s. 14-103.

6. Ready, J.F., *Industrial Applications of Lasers*. Academic Press, 2. painos, 1997, s. 12-18.
7. Wikipedia, Stimulated Emission, viitattu 17.12.2003, saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Stimulated_emission
8. Chryssolouris, G., *Laser Machining*. Springer-Verlag, Berliini, 1991, s. 274.
9. Laserleikkaus, AGA, Espoo, 1998, s. 1-20.
10. Kujanpää, V., Johdatus lasertekniikoihin. Lasertyöstöprosessit ja -laitteet. *Laserasiantuntijakoulutus*, Lappeenranta 15.-17.9.2003, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
11. Hovikorpi, J., *Ideointiseminaari: Laserleikkaussovellukset*. Julkaisematon laskelma, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta, 15.12.2003.
12. Salminen, A., Kujanpää V., *CO₂-laserhitsaus konepajateollisuudessa*. Helsinki, 1997, Metalliteollisuuden keskusliitto, MET-julkaisuja 7/97, s. 6-23.
13. Williams, C., The CO₂ Laser. *The Industrial Laser User* **32**(2003), s. 21-24.
14. Ready, H., Harris, G., Focusing lenses, II-VI Inc., viitattu 22.1.2004, Saatavissa: <http://www.ii-vi.com/pdfs/80410-018.pdf>
15. Kankala, T., Lasertyöstöprosessit ja niiden periaatteet. Lasertyöstöprosessit- ja laitteet, *Laserasiantuntijakoulutus*, Lappeenranta, 15.-17.9.2003, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
16. Hovikorpi, J., Laakso, P., Salminen, A., Miikki, N., Kujanpää, V., Laser Cutting of Pulps. *9th Nolamp Conference*, Einar Halmøy (ed.), Trondheim, Norway, 4-6 August 2003, s. 303-314.

17. Henning, D., Scoring Big with Laser: Lasers and Packaging Technology. *Flexible Packaging* (2001)1, s. 33-34.
18. Mommsen, J., Stürmer, M., Laserschneiden und –perforieren von Filterpapier. *Papier+Kunststoff+Verarbeiter* (1990)8, s. 10-14.
19. Laurila, A., Stanssinvalmistajalle uuden polven tuotantojärjestelmä. *Pakkaus* 34(1998)11, s. 50-52.
20. Boyle, E., Lasers are on the Cutting Edge, Digitally Speaking. *Paper, Film & Foil Converter* (1999)4, s. 14-15.
21. Laserexcel, Laser-cutting and screen-printing solutions, viitattu 2.2.2004, saatavissa: http://www.laserexcel.com/products/greeting_cards.html
22. Ainsworth, H., Laser cutting. *Paper Technology and Industry* (1978)9, s. 220-225.
23. Hovikorpi, J., Sealed tube CO₂-laserin ja x-y-aseman käyttökustannukset. LTY. julkaisematon laskelma.
24. Juselius, A., Paperin ja kartongin leikkaaminen lasersäteellä ja korkeapainevesisuihkulla. *Paperi ja Puu* (1974)4, s. 269-272.
25. Ramsay, I.A., Richardson, B.A., Workington tries laser slitting on coated paperboard. *Paper Tehcnology* 33(1992)9, s. 17-22.
26. Optic.org, Boardeater Cuts Cardboard with Ease, viitattu 2.2.2004, saatavissa: <http://optics.org/articles/news/8/5/30/1>
27. Ducey, M., J., The Rush is on for digital papers. *Graphic Arts Monthly* 75(2003)4, s. 49-50.

28. Davis, D., Digital printing: The first 10 years. *Plant Printer* **43**(2003)5, s. 28.
29. Hülsbusch, W., Laser Cutting of Plastic and Fibre Materials, osa 2. *Papier+Kunststoff+Verarbeiter International* (1991)12, s. 6-10.
30. Polischuk, T., Digital does it. *Package Printing* **50**(2003)4, s. 22-26.
31. Hülsbusch, W., Laser Cutting of Plastic and Fibre Materials, osa 1. *Papier+Kunststoff+Verarbeiter International* (1991)9, s. 18-25.
32. Nader, N., Legacey, S., Chin, S.L., Preliminary investigation of ultrafast intense laser wood processing. *Forest Products Journal* **49**(1999)6, s. 72-77.
33. Perry, M.D., Stuart, B.C., Banks, P.S., Feit, M.D., Sefcik, J.A., Ultrafast Laser for Material Processing. *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Ready, J.F.(ed.), Laser Institute of America, 2001, s. 82.
34. Pat. U.S. 5862845, Use of ultrafast intense laser for processing lignocellulosic material. Universite Laval, Chin, S.L., Nader, N., Lagace, S., Appl. nro. 100766, Publ. 26.1.1999, 4 s.
35. Federle, H., Keller, S., Papierschnneiden mit Laser (Teil 1). *Papier+Kunststoff+Verarbeiter* **27**(1992)7, s. 32-39.
36. Federle, H., Keller, S., Papierschnneiden mit Laser (Teil 2). *Papier+Kunststoff+Verarbeiter* **27**(1992)9, s. 54-58.
37. Rofin-Sinar, Perfolas, viitattu 9.2.2004, saatavissa: <http://www.rofin.com/english/laser/micro/perf/las.htm>
38. Preco Laser Systems, Laser Kiss Cutting, viitattu 9.2.2004, saatavissa: http://www.precolaser.com/applications/processes/kiss_cutting.htm

39. Malmberg, H., Kuluttajapakkauskartonkien laserleikattavuuden karakterisointi. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Kemiantekniikan osasto, Lappeenranta, 2003, s. 111-174.
40. Joore, L., Hüsslage, W., Schneiden von karton mittels lasertechnologie. *Wochenblatt für Papierfabrikation* (2003)6, s. 301-305.
41. Rickli, M., Alternative Schneidtechniken für Papier. Diploma papier, Lausanne, 1982.
42. Krogerus, B., Fillers and pigments. *Paper Chemistry*, Papermaking Science and Technology, vol. 4. Leo Neimo (ed.). Fapet, Helsinki, 1999, s. 117-147.
43. Beuleke, E., Burri, P., Streichpigmentkonzepte der Zukunft. *Wochenblatt für Papierfabrikation* **127**(1999)22, s. 1482-1487.
44. Lehtinen, E., Introduction to pigment coating of paper. *Pigment Coating and Surface Sizing of Paper*, Papermaking Science and Technology, vol. 11, Lehtinen, E. (ed.). Fapet, Helsinki, 2000, s. 14-19.
45. Eiroma, E., Huuskonen, J., Paperin ja kartongin pigmenttipäällystys. *Paperin valmistus III*, osa 1, Arjas, A.(ed.). SPIY, 2. uudistettu painos, Turku, 1983, s. 323-343.
46. Böhmer, E., Thermal properties. *Handbook of Physical Testing of Paper*, vol. 2, Mark, R.(ed.). 2. uudistettu painos, New York, Dekker, 2002, s. 404-406.
47. Oates, T., Lime and Limestone. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, vol. A15, Elvers, B.(ed.), Hawkins, S.(ed.). 5. painos, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1990, s. 317-343.

48. Hu, N., Scaroni, A.W., Fragmentation of calcium-based sorbents under high heating rate, short residence time conditions. *FUEL* **74**(1995)3, s. 374-382.
49. Kaolin Clay: Functional Optical Additives, viitattu 19.2.2004, Saatavissa: http://www.pcimag.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP_Features_Item/0,1846,105008,00.html
50. Taskinen, J., Kierrätyskuidun ja jätöpaperin energiahyötykäyttö. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto, 1992, s. 49-56.
51. Fibersource, Cellulose. Viitattu 11.5.2004, saatavissa: <http://www.fibersource.com/f-tutor/cellulose.htm>
52. Tamminen, T., Paperin lisäaineiden vaikutus poltossa syntyviin päästöihin. Kirjallisuuskatsaus, Oy Keskuslaboratorio – Centrallaboratorium Ab, Espoo, 1994, s. 10-12.
53. FDM Electronic Handbook of FTIR Spectra. Viitattu 19.5.2004, saatavissa: http://www.fdmspectra.com/fdm_ehb.htm