

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
Kemiantekniikan osasto  
Paperitekniikan laboratorio

# **Paperin ja kartongin venymä ja venymään vaikuttavat tekijät**

Heikki Mutikainen, Tkk N

1.9.2008

## SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto.....	2
2	Paperin ja kartongin reologiset ominaisuudet.....	2
3	Paperin ja kartongin venymä.....	3
	3.1 Tason suuntainen venymä.....	3
	3.2 Tason vastainen venymä.....	8
4	Paperin ja kartongin venymän mekanismi.....	10
	4.1 Tason suunta.....	11
	4.2 Z-suunta.....	13
5	Paperin ja kartongin venymän mittausmenetelmät.....	14
	5.1 Tason suuntaiset mittausmenetelmät.....	14
	5.2 Z-suuntaiset mittausmenetelmät.....	15
6	Paperin ja kartongin venymään vaikuttaminen.....	16
	6.1 Massatekijät.....	18
	6.2 Lämpötila ja kosteus.....	20
	6.3 Kuitujen modifiointi.....	22
7	Paperin ja kartongin venymän vaikutus jälkikäsitteilyyn ja tuotteiden ominaisuuksiin.....	23
	7.1 Painopaperit.....	23
	7.2 Säkkipaperi.....	24
	7.3 Pakkauskartonki.....	24
8	Yhteenveto.....	25
	LÄHDELUETTELO.....	27

## **1 Johdanto**

Paperiin ja kartonkiin kohdistuu valmistusprosessin jälkeenkin jälkikäsitellyssä ja loppukäytössä paljon tason suunnassa ja tasoa vasten kohtisuorassa suunnassa vaikuttavia voimia. Paperin ja kartongin reologisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan niiden käyttäytymistä näiden voimien alaisena. Työssä tarkastellaan paperin ja kartongin venymistä paperifysiikan näkökulmasta, paperin viskoelastisten ominaisuuksien vaikutusta venymään ja venymän ilmiöitä selittäviä mekanismeja. Koneella ajettavuuden lisäksi, venymä on tärkeä ominaisuus paperin ja kartongin käyttäytymisen kannalta jälkikäsitellyssä, painokoneella ja loppukäytössä; erityisesti pakkauskartonkien ja -paperien käytön kannalta venymä ja mahdollisimman hyvä venymän palautuvuus eli materiaalin kimmokerroin ovat ratkaisevia.

## **2 Paperin ja kartongin reologiset ominaisuudet**

Reologisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan materiaalien käyttäytymisistä rasituksen alaisena. Paperin ja kartongin reologisia ominaisuuksia tarkasteltaessa materiaali oletetaan yleensä homogeeniseksi, vaikka kuidut saavat massan valmistuksessa yksilöllisiä ominaisuuksia valmistusmenetelmästä riippuen; paperi- tai kartonkikoneella rainausvaiheessa muodostuu kuituorientaatiota, flokkeja ja toispuolisuutta. Lisäksi kartonki on monikerrosrakenteensa puolesta tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa eli z-suunnassa epähomogeeninen. Paperin ja kartongin epähomogeenisuus ja siitä johtuvat ilmiöt tulevat selkeästi esiin silloin, kun halutaan selittää reologisten ominaisuuksien taustaa rakenteen ja kemiallisten ilmiöiden avulla.

/1/

Yleisimmät papereiden ja kartonkien reologisia ominaisuuksia luonnehtivat testausmenetelmät jäljittelevät jotakin paperista tai kartongista valmistettuja tuotteita kuormittavia mekanismeja. Reologisista ominaisuuksista yleisimmin määritettyjä ovat vetolujuus, puhkaisulujuus, repäisyjujuus, palstautumislujuus ja tahttolujuus sekä

erityisesti kartongeista määritetyt kokoonpuristuvuus ja jäykkyys, jota luonnehtivia mittauksia ovat taivutuslujuus, rengaslitistyslujuus, litistyslujuus ja lävistyslujuus (vrt. paperin puhkaisulujuus). Osassa mittausmenetelmiä materiaalin kuormitusmekanismi on melko monimutkainen eikä mittauksista saatujen arvojen ja paperin rakenneominaisuuksien välisen riippuvuuden tarkastelu ole kovinkaan yksinkertaista. /1/

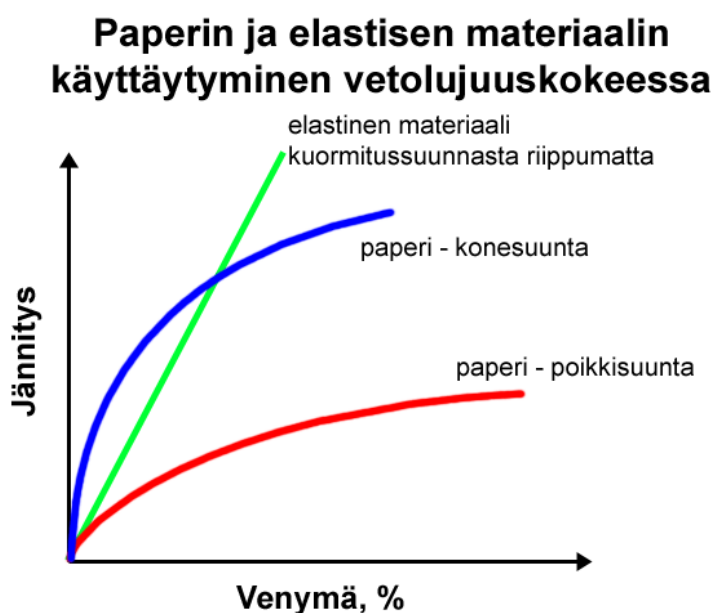
### **3 Paperin ja kartongin venymä**

Yksinkertaisin paperin ja kartongin kuormitustapa on tason suuntainen kuormitus. Tämän kaltaisen kuormituksen alaista paperin ja kartongin käyttäytymistä onkin tutkittu paljon, ja olennaisena osana tutkimuksissa on myös ollut paperin ja kartongin viskoelastisten ominaisuuksien, mm. venymän ja kimmokertoimen, tutkiminen. Viime aikoina erityisesti kartongin osalta on alettu tutkia myös tasoa vastaan kohtisuoraa eli z-suuntaista venymää, koska kartongin jälkikäsitteilyn ja kartongista valmistettujen tuotteiden käytön kannalta z-suuntaisella venymällä on usein suuri merkitys. /1/

#### **3.1 Tason suuntainen venymä**

Tutkimuksen pohjalta on havaittu, että paperi käyttäytyy kuin viskoelastinen aine eli voiman vaikutuksen alaisena paperilla on sekä elastisen- että viskoottisen aineen ominaisuuksia; esimerkiksi venytyksen alaisena olleen paperin muodonmuutoksesta osa palautuu välittömästi, osa jonkin ajan kuluttua ja osa muodonmuutoksesta ei palaudu ollenkaan. Paperin viskoelastinen luonne havaitaan selkeästi paperin käyttäytymistä vetolujuuskokeessa kuvaavasta jännitys-venymäkuvaajasta (joskus puhutaan myös voima-venymäkäyrästä), jossa jännitys tarkoittaa koeliuskaan kohdistuvaa voimaa leveysyksikköä kohden. Kuvassa 1 on esitetty jännitys-venymäkuvaaja paperin käyttäytymisestä vetolujuuskokeessa kone- ja

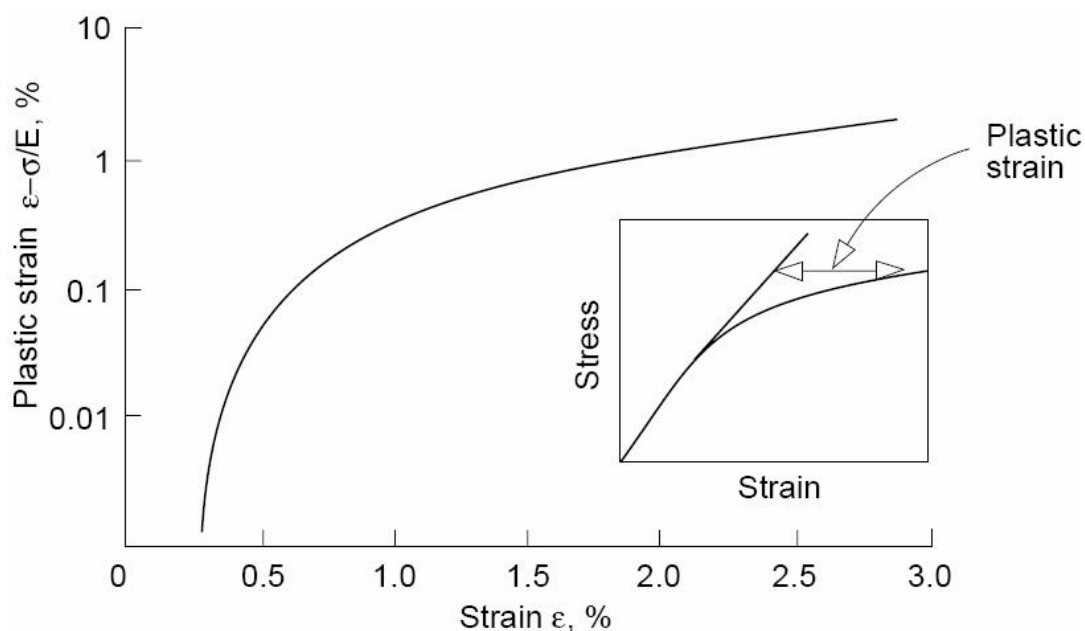
poikkisuunnassa sekä vertailun vuoksi elastisen materiaalin käyttäytymistä vastaavassa kokeessa. /1,2/



Kuva 1. Paperin käyttäytyminen vetolujuuskokeessa kone- ja poikkisuunnassa. Lisäksi kuvassa esitetty vertailun vuoksi myös jokin elastinen materiaali.

Kuvasta 1 havaitaan, että paperin kone- ja poikkisuunnan jännitys-venymäkäyrät ovat epälineaarisia. Elastisen materiaalin jännitys-venymäkuvaaja on lineaarinen eikä kaareva, kuten paperin kone- ja poikkisuunnan kuvaaja. Täysin elastinen materiaali palautuu kuormituksen loputtua täysin alkuperäiseen muotoonsa, mutta paperin viskoelastinen luonne voidaan hyvin havaita myös palautumisesta kuormituksen jälkeen, sillä osa venymästä palautuu heti, osa palautuu jonkin ajan kuluttua ja osa muodonmuutoksesta ei palaudu ollenkaan. Näiden kolmen venymän esiintymismuodon osuus riippuu vedon vaikutuksesta tapahtuvasta kokonaisvenymästä. Jos paperia venytetään vakiovoimalla, tapahtuu lopuksi murtuminen. Tavallisesti paperin kokonaisvenymä ennen murtumista eli murtovenymä on luokkaa 1 % – 5 %, joillakin erikoislaaduilla, kuten tisuella, murtovenymä voi olla jopa 20 %. Kimmoinen, välittömästi palautuva muodonmuutos

eli nopea venymä on vallitseva mekanismi, kun kokonaisvenymä on pieni. Vastaavasti plastinen, palautumaton muodonmuutos on vallitseva mekanismi, kun kokonaisvenymä on suuri. Tutkimuksissa on myös havaittu, että jännitys-venymäkäyrän muoto riippuu kuormitusnopeudesta, joten myös murtokuormituksen ja murtotyön on todettu riippuvan vetonopeudesta. Kuvassa 2 on esitetty jännitys-venymäkäyrän epälineaarisuus ilmaistuna plastisena muodonmuutoksena venymän funktiona. Plastinen muodonmuutos on esitetty logaritmisella asteikolla. Kuvan 2 pikkukuvassa on esitetty jännitys-venymäkäyrän muuttuminen elastisesta plastiseen. Kohtaa, jossa paperin käyttäytyminen jännityksen alaisena muuttuu elastisesta plastiseksi, kutsutaan juoksurajaksi. /1,2/

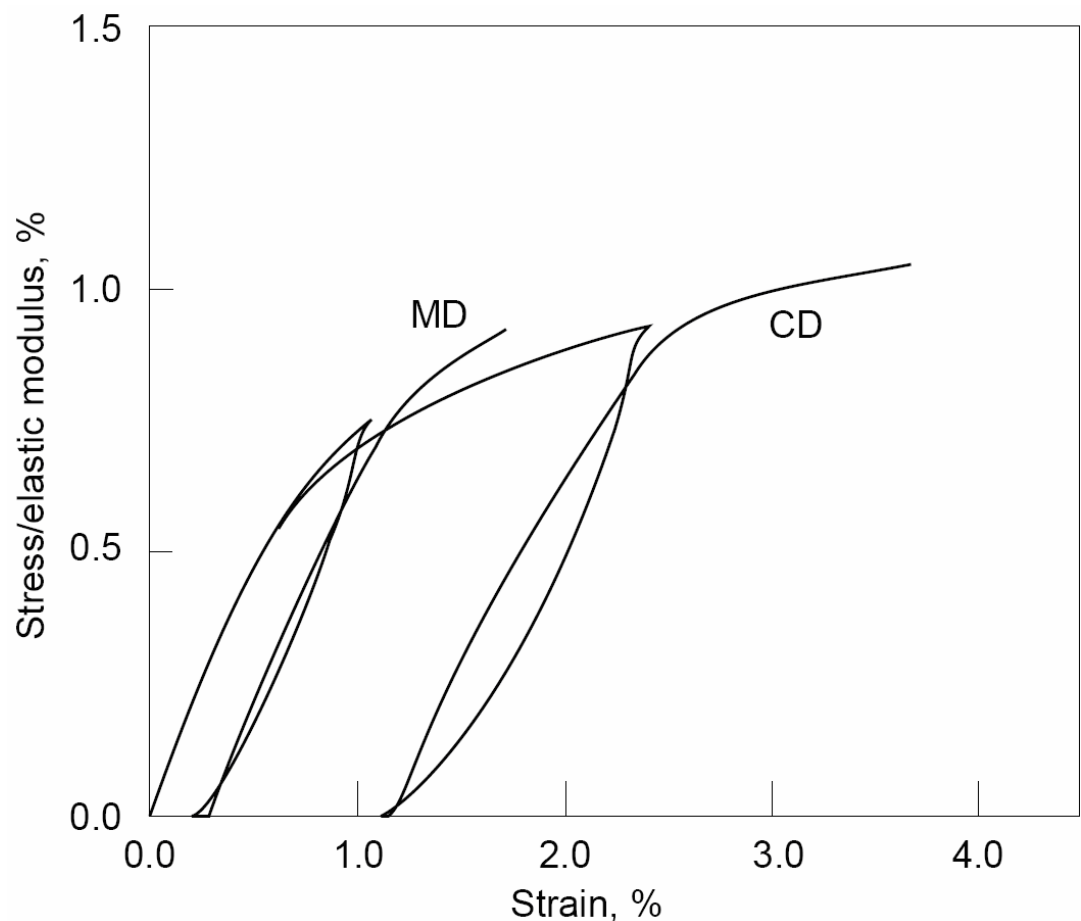


Kuva 2. Juoksurajan jälkeinen plastinen muodonmuutos esitettynä kokonaismuodonmuutoksen funktiona. /2/

Kuva 2 alkaa juoksurajasta eli plastinen muodonmuutos alkaa paperin venymän ollessa hieman alle 0,3 %. Kuvan 2 pikkukuvassa tämä siis tarkoittaa kohtaa, jossa jännitys-venymäkäyrä irtoaa elastisen muodonmuutoksen kulmakerrointa esittävästä käyrästä. Kuvasta 2 ei voida selkeästi nähdä plastisen muodonmuutoksen ja

kokonaismuodonmuutoksen välistä riippuvuutta, sillä plastinen muodonmuutos on esitetty logaritmisella asteikolla. /2/

Paperin vetokuormituskokeessa voidaan havaita muutamia paperin viskoelastisista ominaisuuksista johtuvia ilmiöitä. Paperille ominainen ”muistiefekti” havaitaan, jos paperia kuormitetaan, kunnes kuormitus lopetetaan juuri ennen näytteen katkeamista ja tämän jälkeen aloitetaan näytteen kuormitus samalla kuormituksella. Tällöin paperin jännitys-venymäkäyrä jatkuu suunnilleen samasta kohdasta, kuin mihin kuormitus lopetettiin. Kuvassa 3 on esitelty paperin ”muistiefektiä”. /2/

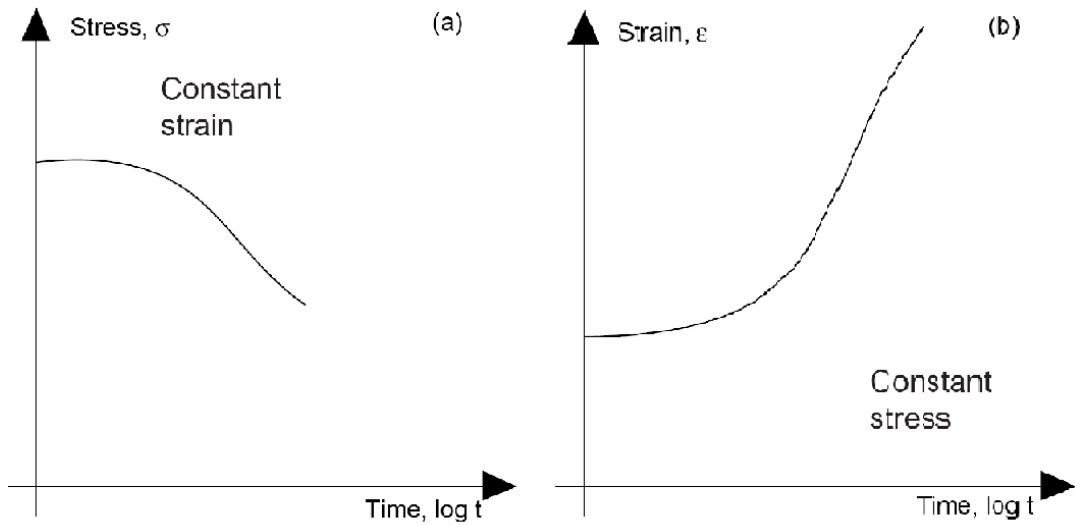


Kuva 3. Paperin ”muistiefekti” vetolujuuskokeessa. /2/

Kuvasta 3 ilmenee myös hystereesi-ilmiö edellä esitetyn kaltaisissa kokeissa siten, että jännitys-venymäkäyrän nouseva ja laskeva käyrä eivät yhdy ja käyrän nousevan haaran kaltevuus eli näytteen uudelleenkuormituksen käyrä on jyrkempi kuin alkuperäisen, ensimmäisen kuormituksen käyrä. Tästä voidaan päätellä, että liuskassa on tapahtunut jäykistymistä. Hystereesisilmukan sisäpuolelle eli nousevan ja laskevan jännitys-venymäkäyrän väliin jäävä pinta-ala kuvaa kuormituksen aiheuttamaa palautumatonta energian absorptiota eli plastista, palautumatonta muodonmuutosta. Rajoittamattomien kuormituskertojen jälkeen edellä mainitun hystereesisilmukan nousu- ja laskukäyrät lähestulkoon yhtyvät, eli liuskassa ei tapahdu kuormitettaessa plastista, palautumatonta muodonmuutosta. /2/

Tiettyyn kuormitukseen venytetty ja tämän kuormituksen alaiseksi jätetty paperi venyy ajan funktiona eli viruu. Tämä tunnetaan myös ”creep-ilmiönä”. Vakiona pidettävän kuormituksen vaikutuksen alainen paperi lopulta katkeaa, ja luonnollisesti katkeamiseen kuluva aika on suoraan verrannollinen paperiin kohdistuvaan kuormitukseen. Kuvassa 4b on esitetty jännitys-venymäkäyrä paperin virumisesta. Paperin relaksoitumisilmiö taas havaitaan, kun paperi venytetään tiettyyn pisteeseen ja tämän jälkeen pidetään samassa pituudessa. Aluksi paperissa oleva jännitys poistuu nopeasti ja ajan funktiona relaksaationopeus laskee. Relaksaationopeuden on todettu olevan alkujännityksen lineaarinen funktio, mitä havainnollistetaan kuvassa 4a. /2,3/





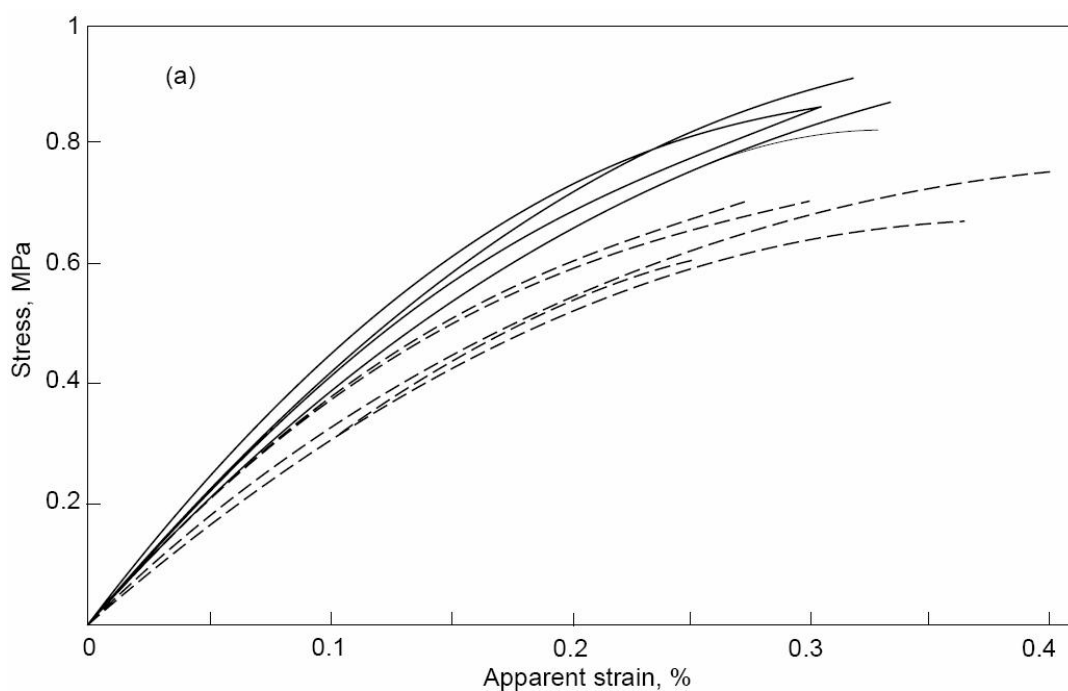
Kuva 4. Paperin relaksaatio (a) ja paperin viruminen (b) logaritmisella asteikolla esitettynä /3/

Jännitys-venymäkäyrän elastisen muodonmuutoksen kulmakerroin on samalla paperin kimmokerroin. Se on tärkeä ominaisuus kuvaamaan paperin reologisia ominaisuuksia, sillä harvoin paperia kuormitetaan lähelle murtojännitystä. Kimmokerroin voidaan mitata ultraääneen perustuvilla menetelmillä. Kimmokerroin, jonka symboli on  $E$  ja yksikkö GPa, kuvaa pieneen venymään vaadittua voimaa eli aineen kykyä vastustaa muodonmuutosta. Paperin kimmokerroin on erilainen kone-, poikki- ja paksuussuunnassa. /2/

### 3.2 Tason vastainen venymä

Tasosta kohtisuoraan ulospäin suuntautuva lujuus eli z-suuntainen lujuus kuvaa paperin ja kartongin kykyä vastustaa paksuussuuntaista vetojännitystä. Z-suuntaista lujuutta kuvaillaan monilla eri termeillä, jotka useimmat liittyvät kartongin kerrosrakenteeseen ja joille ei ole tarkkoja suomenkielisiä vastineita. Scott Bond kuvaa kerrostenvälistä lujuutta mitattuna Scott Bond –mittausmenetelmällä; papereilla se kuvaa arkin sisäistä lujuutta. Kartonkien monikerrosrakenteeseen liittyviä ovat Internal Bond strength, joka kuvaa erityisesti runkokerroksen sisäistä

lujuutta, ja Ply-Bond strenght, joka kuvaa monikerroskartongin kerrosten liittymistä toisiinsa. Lisäksi puhutaan usein yleisesti ja papereiden osalta z-lujuudesta ja palstautumislujuudesta (delamination strenght). Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen z-suuntainen jännitys-venymäkäyrä. /4/



Kuva 5. Z-suuntaisen voiman vaikutuksen alaisen paperin jännitys-venymäkäyrä. /4/

Kuvasta 5 havaitaan, että verrattuna kuvan 1 pituus- tai poikkisuunnan käyrään z-suunnan jännitys-venymäkäyrän elastinen osa on lyhyt ja plastisen muodonmuutoksen osuus alkaa lähes välittömästi. Kuvasta 5 havaitaan myös, että z-suuntainen murtovenymä on pieni, alle 0,5 %, kun paperin pituus- tai poikkisuunnassa murtovenymä on yleensä useita prosentteja. Myös kimmokerroin on pieni, 0,5 MPa. Tämä on noin kymmenesosa tyypillisestä tason suuntaisesta kimmokertoimesta. Tämäkin luku on aika suuri, normaalisti z-suunnan kimmokertoimet ovat n. 0,05 – 0,1 MPa; z-suuntaisen kimmokertoimen voidaan karkeasti olettaa olevan prosentin luokkaa tason suuntaisesta kimmokertoimesta. Plastisen muodonmuutoksen on todettu alkavan z-suuntaisen vetojännityksen

alaisessa paperissa tai kartongissa silloin, kun kuitujen väliset sidokset alkavat aueta. Jännitys-venymäkäyrän muodosta voidaan havaita, että kuiduille tapahtuu ennen tätä vähäistä elastista muodonmuutosta. /4/

Z-suuntainen lujuus on herkkä paperin paksuussuuntaisen epähomogeenisuuden ja kerrostuneisuuden suhteen. Heikoimman tason sijainti z-suunnassa riippuu hieno- ja täyteaineiden paksuussuuntaisesta jakautumisesta, tiheyden ja kuitujen sitoutumisasteen suhteesta sekä mahdollisesta liimauksesta. Paperin paksuussuuntainen materiaali jakauma riippuu vahvasti paperikoneen formeri- ja puristinosien laiteratkaisuista. /4/

Kartongeilla myös kerrosten sisäisellä lujuudella ja kerrosten välisten sidosten lujuudella on merkitystä. Z-suuntaisen venymän kannalta kerrosten välinen pinta on usein heikko kuiturakenteen epäjatkuvuuden vuoksi. Tämä johtuu siitä, että kerrokset, joita on tyypillisesti kolme, rainataan erillään toisistaan ja huopautetaan yhteen formeriosan lopussa. Kerrosten välinen sitoutuminen tapahtuu samalla tavalla kuin sisäinenkin, eli vetysidoksia muodostuu kerroksien välille kiintoainepitoisuuden noustessa riittävästi, yleisimmin sidokset alkavat muodostua vasta puristusosan jälkeen. Kerrosten välinen sitoutuminen paranee märkäpuristuksessa, kun kerrosten välinen sidospinta-ala kasvaa. Korkea hienoainepitoisuus kerrosten kontaktipinnoilla parantaa kerrosten välistä sitoutumista. Useilla kartonkikoneilla käytettävillä tasoviirroilla paksuussuuntainen hienoainejakauma on keskittynyt viirapuolelle, joten paras kerrosten välinen sitoutuneisuus saavutetaan puristamalla viirapuolet vastakkain. Sitoutuneisuutta voidaan myös parantaa suihkuttamalla liimaa, esimerkiksi tärkkiä, kerrosten väliin. /4/

#### **4 Paperin ja kartongin venymän mekanismi**

Kappaleessa 3 esiteltäisiin paperin ja kartongin venymän ilmiöihin on olemassa molekulaarisia ja kuituverkoston perustuvia teorioita, joiden avulla venymää

voidaan tarkastella tarkemmin. Mikroskooppitasolla tarkasteltaessa vedonalaista paperia havaitaan, että kuitusegmentit venyvät osittain palautumattomasti ja sidoksia aukeaa asteittain. On myös todettu, että kimmokerroin ei muutu paperin venyessä ja palautuessa, joten myöskään kuormittavaa voimaa vastustavien kuitusegmenttien määrä ei merkittävästi muutu. /2/

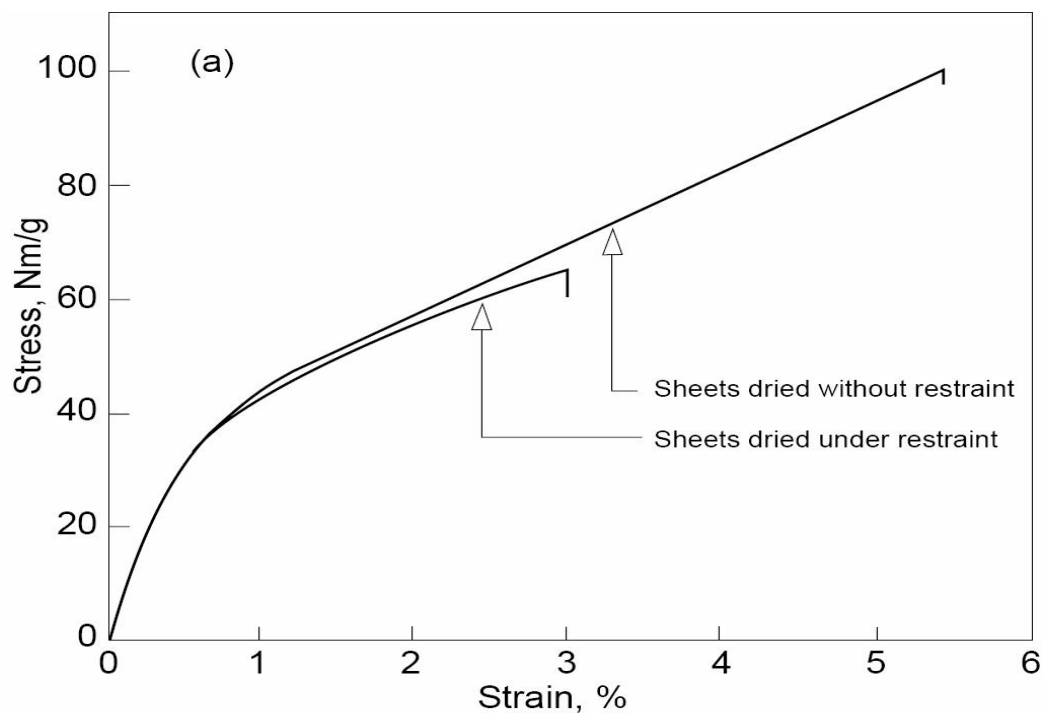
#### **4.1 Tason suunta**

Paperin venymän termodynaamisen tarkastelun pohjalta on havaittu, että paperia kuormitettaessa paperiin virtaa Kelvin-ilmiön mukaisesti lämpöä, jolloin sisäinen energia kasvaa suoraan verrannollisesti kuormitukseen ja lämpövirtaan. Jos kuormitus lopetetaan elastisen venymän aikana, paperi luovuttaa saman määrän lämpöä, kuin se kuormitettaessa absorboi. Toisin sanoen, termodynaamisesti paperin elastinen muodonmuutos on reversiibeli. Jännitys-venymäkäyrän juoksurajan jälkeinen eli plastinen muodonmuutos on vastaavasti termodynaamisesti irreversiibeli, sillä paperi luovuttaa lämpöä sekä venymän kasvaessa että kutistuessa. Kimmokertoimen on kuitenkin todettu muuttuvan epälineaaraisesti termodynaamisten ilmiöiden kannalta, joten irreversiibelin lämmöntuotannon on johduttava mikroskooppisista tai molekulaarisista muutoksista kuiduissa ja sidoksissa, sillä kuitujen ja sidosten täydellinen murtuminen ei selitä termodynaamisia ilmiöitä. Myöskään kuituverkon sitoutumisasteella ei ole todettu olevan ratkaisevaa merkitystä jännitys-venymäkäyrän muodolle. Tiheyden ja suhteellisen sidospinta-alan (engl. relatively bounded area, RBA) on todettu vaikuttavan kimmomoduuliin ja murtovenymään, muttei kuitenkaan jännitys-venymäkäyrän muotoon. Näin ollen myös sidosten aukeamisella ei voida selittää käyrän epälineaarista muotoa. /1,2/

Jännitys-venymäkäyrän epälineaarisuutta ei voida selittää myöskään kuidun sisäisten sidosten asteittaisella aukeamisella. Mikroskooppitason kokeissa sidosten on todettu aukeavan vähitellen, muttei rikkoutuvan kokonaan edes paperin murtuessa. Täydellinen sidosten rikkoutuminen on harvinaista. Sidosten asteittainen aukeaminen

voidaan ymmärtää epäsäännöllisesti sitoutuneiden alueiden sisäisellä jännityksellä. Sidosten aukeamisen on todettu vaikuttavan paperin optisiin ominaisuuksiin, sillä esimerkiksi hajaheijastuskerroin on suoraan verrannollinen paperin plastiseen muodonmuutokseen. /2/

Yksittäisten kuitujen käyttäytymisen, erityisesti kuitujen kutistumisen kuivumisen aikana, on esitetty osittain selittävän paperin kuormitus-venymäkäyrän epälineaarisuutta. Paperin ja kuitujen kuivumisen aikana tapahtuu plastista muodonmuutosta, jos kuivuminen tapahtuu siten, ettei kutistumista tapahdu. Kuvassa 6 on esitetty vapaasti ja estetyksi kuivuneiden arkkien jännitys-venymäkäyrät. /2/



Kuva 6. Vapaasti ja kuivatuskutistumaa estäen kuivatettujen arkkien jännitys-venymäkäyrät. /2/

Kuvasta 6 havaitaan selkeästi, että vapaasti kuivuneiden arkkien jännitys-venymäkäyrä on lineaarisempi kuin ”estyneesti” kuivuneiden arkkien. Kuvasta nähdään myös, että estetyksi kuivuneiden arkkien murtovenymä on huomattavasti

alhaisempi kuin vapaasti kuivuneilla. Kuivumiskutistuma ja sen estäminen vaikuttaa eniten sitoutuneisiin kuitusegmentteihin aiheuttaen jännitystiloja ja mikrokompressioita sekä muita muodonmuutoksia kuituseinään sidoskohdissa ja lisäksi kuitujen suoristumista ja kireyttä verkostossa. Pienellä venymällä kaikkien kuitusegmenttien on todettu venyvän melko tasaisesti, mutta sitoutuneempien segmenttien on havaittu venyneen selvästi vapaampia kuitusegmenttejä enemmän. Pysyvä venymä tapahtuu siis lähinnä vain sitoutuneissa kuitusegmenteissä, kun taas vapaammat kuitusegmentit palautuvat elastisesti. Paperin sisäisen jännitystilan palattua nollaan paperia kuormitettaessa plastisen muodonmuutoksen alueelle sitoutuneet kuitusegmentit ovat puristusjännityksen alaisina ja vapaat kuitusegmentit taas vetojännityksen alaisina, koska vapaat segmentit eivät ole venyneet plastisesti. Tästä johtuen niiden on oltava vetojännityksen alaisina aina, kun ulkoinen venymä on suurempi kuin nolla. Näin tapahtuu silloin, kun paperia kuormitetaan plastisen muodonmuutoksen alueelle. Koska kuituverkoston kokonaisjännitys on nolla, voidaan sitoutuneiden kuitusegmenttien olettaa olevan puristuksen alaisina. /2/

#### 4.2 Z-suunta

Z-suuntaisten lujuusominaisuuksien kannalta kuituverkoston muodostumismekanismilla on merkityksensä. Samansuuntaisesti orientoituneiden kuitujen muodostama eli kerrostunut rakenne hajoaa z-suuntaisen kuormituksen alaisena kuitujen rikkoutumatta. Huopautuneen rakenteen hajotessa kuituja rikkoontuu ja irtoaa verkostosta. Rikkoutumista tapahtuu erityisesti nopean kuormituksen vaikutuksesta. Koska kuidut ovat huomattavasti sidoksia vahvempia, rakenteeltaan huopautuneen paperin z-suuntainen lujuus on huomattavasti suurempi kuin rakenteeltaan kerrostuneen paperin. On myös todettu, että z-suuntainen lujuus kasvaa tiheyden kasvaessa, jos tiheyttä on kasvatettu puristuksella tai jauhatuksella, jolloin kuitujen sidospinta-alaa on saatu kasvatettua. Z-suuntaisen venymän voidaan siis todeta tapahtuvan siten, että lyhyen elastisen venymän alueen jälkeen plastisen

venymän alueella kuitujen väliset sidokset alkavat aueta ja kuidut alkavat mahdollisesti myös irrota rakenteesta. /4/

## **5 Paperin ja kartongin venymän mittausmenetelmät**

Paperin ja kartongin venymän mittausmenetelmät perustuvat usein paperiin ja kartonkiin jälkikäsitellyssä ja loppukäytössä kohdistuvan kuormituksen jäljittelyyn. Menetelmät eroavat toisistaan kuormitusmekanismien ja sen mukaan, halutaanko tarkastella näytteen maksimaalista kestävyyttä vai piirtää näytteen jännitys-venymäkäyrä. Z-suuntaisen lujuuden mittausmenetelmistä useimmat on tarkoitettu lähinnä palstautumisenergian tarkasteluun. /2,4/

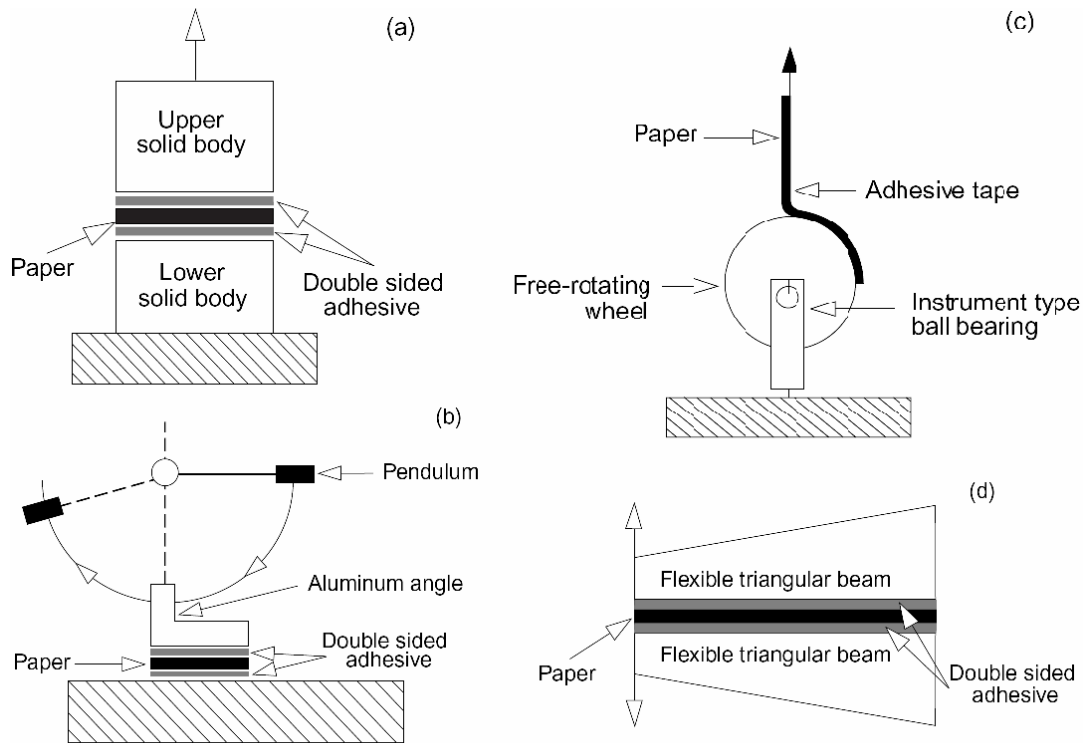
### **5.1 Tason suuntaiset mittausmenetelmät**

Paperin ja kartongin vetolujuuden ja venymän mittausmenetelmillä on useita standardeja. Yleisimmin menetelmät perustuvat näyteliuskan kuormittamiseen vakiovoimalla (ISO 1924-1) tai kohdistamalla liuskaan voimaa siten, että venymä aikaa kohden on vakio (ISO 1924-2). /5/

Vetolujuustesterissä testiliuskaa venytetään, kunnes se murtuu. Vetojännityksen maksimiarvo ja testiliuskan venymä mitataan. Vetojännityksestä lasketaan vetoindeksi, joka ilmaistaan yksikössä Nm/g. Venymä ilmaistaan prosentteina liuskan alkuperäisestä pituudesta. Vetotesterillä määritetään liuskaan kohdistunut voima venymän funktiona. Mittausdatasta voidaan piirtää voima-venymäkäyrä. Nykyaikaiset mittalaitteet on kytketty tietokoneeseen, joka käsittelee mittausdataa ja piirtää automaattisesti voima-venymäkäyrän sekä laskee muita tarvittavia arvoja, esimerkiksi kimmokertoimen. Tuloksia voidaan käyttää reaaliaikaisesti tehtaan tuotannon laadunvalvontaan. /5,6/

## 5.2 Z-suuntaiset mittaamenetelmät

Z-suuntaisen venymän mittaamiseksi näyte pitää kiinnittää kaksipuolisella teipillä tai liimalla molemmilta puolilta metallikappaleisiin, joiden välityksellä näytteeseen voidaan kohdistaa z-suuntaista venyttävää voimaa. Kuvassa 7 on esitetty periaatekuvat z-suuntaisten reologisten ominaisuuksien mittaamiseen käytetyistä menetelmistä. /4,5/



Kuva 7. Z-suuntaisten lujuusominaisuuksien testimenetelmiä. Menetelmää a käytetään murtojännityksen määrittämiseen, menetelmiä b, c ja d palstautumisenergian määrittämiseen. /4/

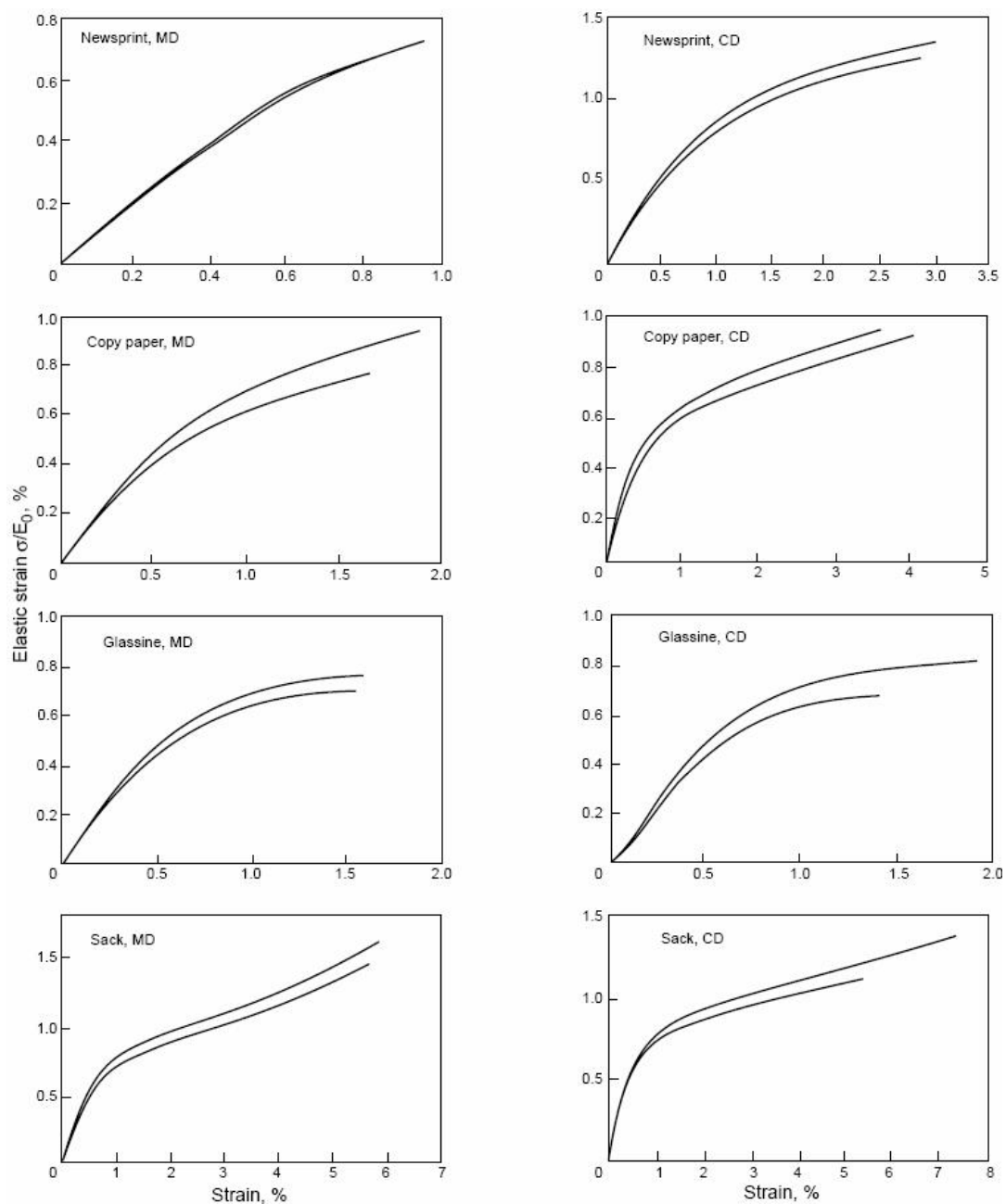
Kuvan 7 testimenetelmän a mukaiset laitteistot soveltuvat z-suuntaisen murtojännityksen määrittämiseen, mutta eivät voima-venymäkäyrän tai palstautumisenergian määrittämiseen. Kuvan 7 menetelmän b mukaista Scott bond -testeriä käytetään palstautumisenergian määrittämiseen. Siinä heiluri tuottaa L-palkin



välityksellä lähinnä tason suuntaista voimaa näytteen pintaan, jolloin tapahtuu palstautumista käytännön tilannetta vastaavalla tavalla. Kuvan 8 menetelmät c ja d on kehitelty vakaamman ja hallitumman palstautumistapahtuman palstautumisenergian määrittämiseksi. Molemmissa menetelmissä näytteeseen vaikuttava voima on vakio koko määrittämisen ajan. Jokaisessa menetelmässä paperi tai kartonki kiinnitetään laitteistoon kaksipuoleisella teipillä tai vastaavalla menetelmällä. Liima-aineen tunkeutuminen huokosrakenteeseen voi aiheuttaa joillakin paperi- ja kartonkilaaduilla mittausvirhettä. /4,5,7/

## **6 Paperin ja kartongin venymään vaikuttaminen**

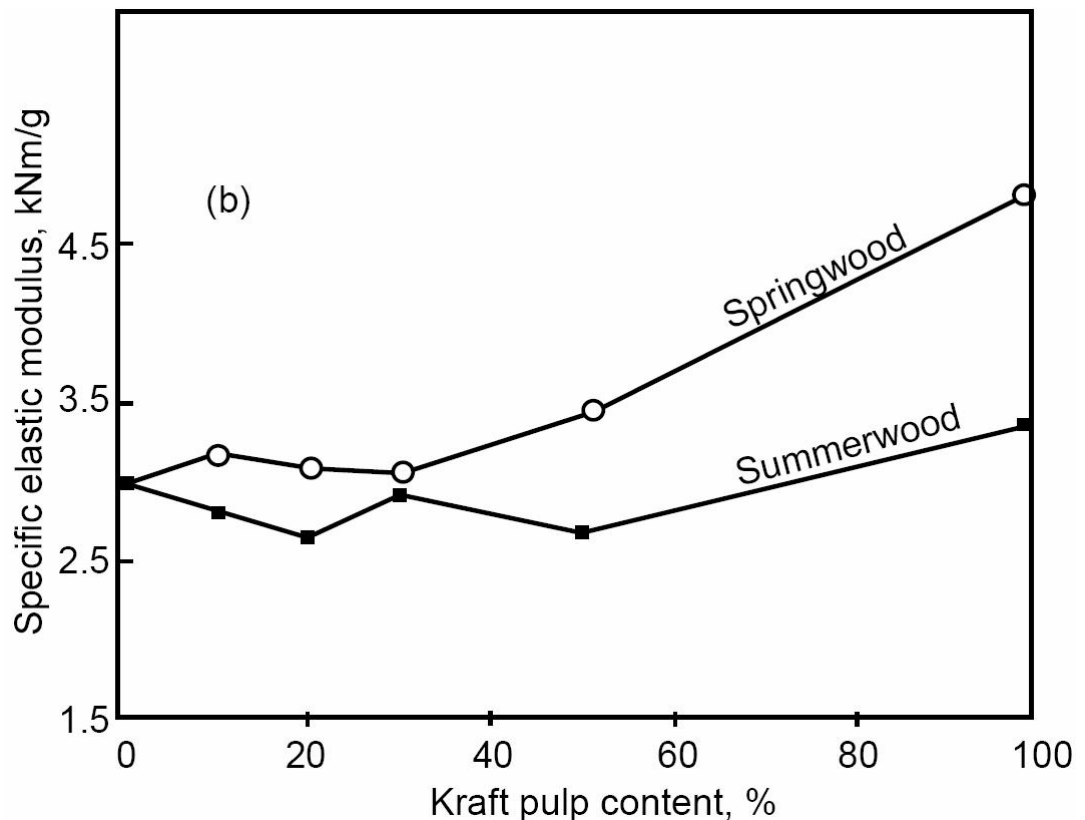
Suurin paperin jännitys-venymäkäyrän muotoon vaikuttava tekijä on kimmokerroin. Kimmokertoimeen vaikuttaa RBA eli kuidun sitoutuneen pinnan suhteellinen osuus, paperin tiheys, sellun jauhatasaste, kuivatuskutistuma ja kuituorientaatio. Muita jännitys-venymäkäyrään merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ovat kuivatuskutistuma, massojen valmistukseen käytetyt puulajit, paperin resepti erityisesti massojen osalta sekä kuitujen käpertyminen ja kihartuminen. On todettu, että merkittävin ero laboratorioarkkien ja paperikoneella valmistetun paperin venymien välillä johtuu kuivatusmekanismista. Kuivatusjännitys on kääntäen verrannollinen kuivatusaikaan ja -lämpötilaan. Kuvassa 8 on esitetty eri paperilajien karakteristiset voima-venymäkäyrät kone- ja poikkisuunnassa. Kuormitusvoima on ilmaistu elastisen muodonmuutoksen avulla eli voima on jaettu kimmokertoimella, koska suurimmat erot paperilajien välillä johtuvat niiden erilaisista kimmokertoimista. /2/



Kuva 8. Karakteristiset voima-venymäkäyrät eri paperilajeille kone- ja poikkisuunnassa. /2/

## 6.1 Massatekijät

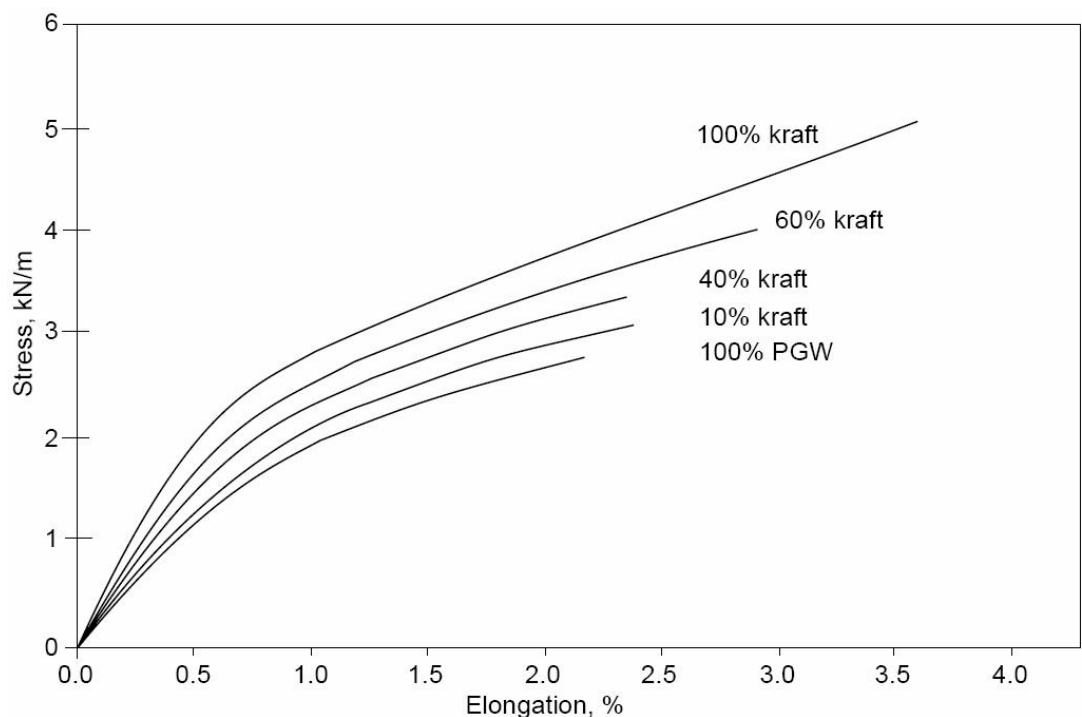
Mekaanisen massan ja sellun vaikutukset paperin lujuusominaisuuksiin ovat melko tunnettuja. Mekaanisen massan ja sellun seossuhteilla voidaan myös vaikuttaa paperin reologisiin ominaisuuksiin. Kun sellun osuutta mekaanisen massan ja sellun muodostamassa massaseoksessa lisätään, paperin vetolujuus ja kimmokerroin paranevat. Kuvassa 9 on esitetty TMP-sulppuun lisätyn sellun vaikutus paperin ominaiskimmokertoimeen. Kuvassa on verrattu lisäksi kevät- ja kesäpuusta valmistettujen sellujen vaikutuksia. /2/



Kuva 9. Sellun määrän vaikutus TMP:n ja sellun seoksesta valmistettujen arkkien ominaiskimmokertoimeen. /2/

Kuvasta 9 havaitaan, että sellun lisäyksen vaikutus kimmokertoimeen on etenkin kesäpuusellulla noin 50 %:n pitoisuuteen asti melko epälineaarinen. Tyypillisesti

n.20 – 50 %:n pitoisuudessa ominaiskimmokertoimen voidaan odottaa alkavan kasvaa lineaarisesti sellupitoisuuden kasvaessa, mutta joissakin tapauksissa jopa aivan pienet sellupitoisuudet voivat vaikuttaa todella merkittävästi ominaiskimmokertoimeen. Kuvassa 10 on esitetty PWG:n ja sellun seoksesta tehtyjen arkkien voima-venymäkäyrä erilaisilla seossuhteilla sekä pelkällä sellulla ja painehiokkeella. /2/



Kuva 10. Voima-venymäkäyrät PGW:n ja havusellun seoksesta valmistetuille arkeille sellun massaosuuksien ollessa 0, 10, 40, 60 ja 100 % /2/

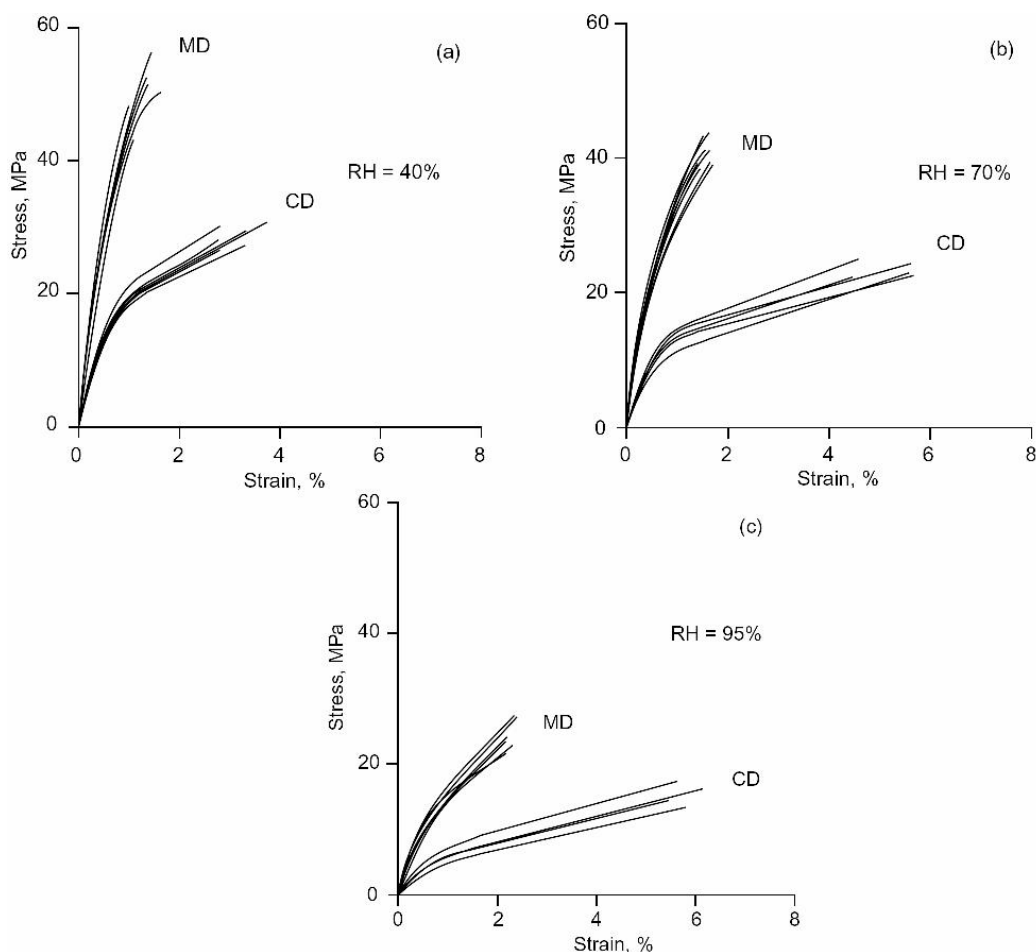
Jauhatuksella on myös todettu olevan jonkin verran vaikutuksia paperin venymään, sillä jauhatusasteen kohotessa kuitujen RBA kasvaa. Toisaalta, jauhatuksella on myös vaikutuksia sidoseenergiaan sekä kuitujen pituuteen, kiharuuteen ja vahvuuteen. Korkean jauhatusasteen kuitujen välille muodostuvien sidosten on todettu kestävän enemmän venytystä kuin matalamman jauhatusasteen kuitujen välisten sidosten. Korkea jauhatusaste lisää hienoaineen määrää, jolloin paperin vetolujuus paranee.

Tällöin siis kuitujen sidoslujuus paranee, mutta paperin kimmokertoimeen massan sisältämän hienoaineen määrä ei suoranaisesti vaikuta. /2/

Myös paperin kuivatuskutistumalla on vaikutusta paperin reologiaan. Paperin kimmokertoimen on todettu kasvavan, jos paperin kuivatuskutistumaa rajoitetaan tai märkää paperia venytään. Vaikutus on suurin eniten kutistuvilla massoilla eli selluilla ja pienin mahdollisimman vähän jauhetuilla mekaanisilla massoilla. Kutistuman aiheuttamat mikrokompresiot vaikuttavat erityisesti elastiseen murtovenymään, mutta vaikutukset ilmenevät selvästi vasta kuivatuskutistuman ollessa lähellä maksimia. Koneella rainatuissa papereissa konesuunnan ja poikkisuunnan kimmokertoimien suhde on verrannollinen vetolujuuksiin. Kyseinen korrelaatio pätee luonnollisesti paremmin keskellä rataa kuin reunoilla. /2/

## 6.2 Lämpötila ja kosteus

Lämpötila ja kosteus vaikuttavat paperin viskoelastisiin ominaisuuksiin huomattavasti. Jännitys-venymäkäyrän juoksurajaa edeltävä, elastista muodonmuutosta kuvaava osa loivenee eli kimmokerroin alenee vallitsevan ilmaston kosteuden noustessa. Tällöin plastinen muodonmuutos tulee vallitsevaksi venymän mekanismiksi, jolloin voidaan päätellä paperin vetolujuuden alenevan ja murtovenymän, eli paperin murtumiseen asti saavutetun venymän, kasvavan. Molekyyalitasolla ilmiön voidaan todeta johtuvan hemiselluloosan pehmenemisestä kosteuden vaikutuksesta. Kuidut ja erityisesti kuitujen väliset sidokset menettävät tällöin jäykkyyttään, ja teoriassa ilmiön johdosta kuidut voisivat poistua kuituverkostosta vahingoittumattomina vetotyön vaikutuksesta. Kuvassa 11 on esitetty kartongin kone- ja poikkisuunnan jännitys-venymäkäyriä, kun vallitseva suhteellinen kosteus on 40 %, 70 % ja 95 %. /3/



Kuva 11. Kartongin kone- ja poikkisuunnan jännitys-venymäkäyriä suhteellisen kosteuden ollessa 40 %, 70 % ja 95 %. /3/

Kuvasta 11 nähdään selkeästi, että suhteellisen kosteuden noustessa jännitys-venymäkäyrän elastista muodonmuutosta vastaava osa loivenee eli kimmokerroin pienenee suhteellisen kosteuden funktiona. Kimmokerroimen on todettu olevan kosteudesta riippumaton alle 5 %:n suhteellisilla kosteuksilla. Myös lämpötilan vaikutuksesta tapahtuu vastaavia ilmiöitä, sillä paperin kimmokerroin alenee lämpötilan noustessa. Toisaalta, lämpötila vaikuttaa myös ilman absoluuttiseen kosteuteen, jolloin se vaikuttaa myös epäsuorasti venymään. /3/

### 6.3 Kuitujen modifiointi

Kuitujen modifioinnilla voidaan vaikuttaa paperin ja kartongin reologisiin ominaisuuksiin. Averheim et al. /8/ ovat tutkineet monikerroksisen polyelektrolyttikäsittelyn seurauksena nousutta havusellun sidostenmuodostuskykyä ja jauhatuksen sekä kuivatuksen vaikutuksia siihen. Tutkimuksessa tehtiin ISO- ja vapaasti kuivuneita arkkeja säkkipaperireseptillä käyttäen suoraan tehtaalta otettua valkaisuamatonta havusulfaattisellua, jota jauhatettiin erilaisilla laboratorio- ja pilot-mittakaavan laitteistoilla jauhatuksen vaikutuksen tutkimiseksi. Kuitujen monikerroksikäsittelyssä käytettiin kationisena polyelektrolyttinä perunatärkkelystä ja anionisena karboksyyylimetyyliselluloosaa eli CMC:aa. Jokaisesta massaerästä valmistettiin kolme massaa, joista kahdesta puolet käsiteltiin polyelektrolyyteillä: toinen pelkällä tärkkelyksellä ja toinen kerroksittain: ensin tärkkelyksellä, minkä jälkeen CMC:lla ja vielä lopuksi tärkkelyksellä. Jokaisen massaerän yhdestä massasta valmistettiin arkkeja ilman polyelektrolyttikäsittelyä. Massoista valmistetut arkit kuivattiin hieman eri menetelmin, lisäksi ISO-arkkien kuivatuskutistuma pyrittiin estämään. /8/

Tutkimuksessa tutkittiin melko laajasti monikerroksisen polyelektrolyttikäsittelyn vaikutuksia paperin reologisiin ominaisuuksiin tason suunnassa ja z-suunnassa. Monikerroksikäsittelyllä kuitujen pintaan adsorboituneen tärkkelyksen ja karboksimeetyyliselluloosan todettiin parantavan molemmilla menetelmillä valmistettujen arkkien Scott-Bond -arvoja verrattuna pelkkään tärkkelyskäsittelyyn. HC-sakeudessa paineen alaisena 175 °C:ssa jauhatetusta massasta valmistetut ISO-arkit, joita oli käsitelty tärkkelys-CMC-tärkkelys -sekvenssillä, olivat Scott-Bond –arvoltaan jopa 275 % referensinäytettä parempia. Tason suuntaisissa ominaisuuksissa, kuten murtovenymässä tai vetoindeksissä, ei ollut kovinkaan suuria eroja pelkällä tärkkelyksellä tai tärkkelys-CMC-tärkkelys -sekvenssillä käsitellyistä massoista valmistettujen ISO-arkkien välillä. Kuivatuksen vaikutuksista tutkimuksessa todettiin monikerroksisen polyelektrolyttikäsittelyn vaikutusten

olevan positiivisemmat vapaasti kuivatettujen arkkien lujuusominaisuuksien osalta. Kyseinen kuivatusmenetelmä jäljittelee paremmin säkkipaperin kuivatusmekanismia paperikoneella. Kaikissa tapauksissa arkkien tiheyden todettiin paranevan monikerroksisen polyelektrolyyttikäsittelyn seurauksena. /8/

## **7 Paperin ja kartongin venymän vaikutus jälkikäsittelyyn ja tuotteiden ominaisuuksiin**

Paperin ja kartongin venymällä on paljon merkitystä jälkikäsittelyyn, painatuksen ja tuotteiden loppukäytön kannalta. Paperilta ja kartongilta vaaditaan erilaisia reologisia ominaisuuksia käytettävien painomenetelmien ja tuotteen loppukäytön aiheuttaman rasituksen mukaan. Nykyään asiaa monimutkaistavat lisäksi komposiittirakenteet ja erilaiset päällystystekniikat. /9,10/

### **7.1 Painopaperit**

Arkkipainomenetelmissä paperin lujuusominaisuudet eivät vaikuta kovinkaan paljon painokoneen ajettavuuteen eivätkä täten myös tuotteen ominaisuuksiin. Rainapainokoneissa rainan jännitystilat vaikuttavat painokoneen ajettavuuteen. Jännitystiloihin vaikuttaa luonnollisesti paperin jännitys-venymäkäyttäytyminen, jännityksen relaxoituminen ja paperin viruminen. Paperikoneella, kalanteroinnissa ja päällystyksessä syntyneet kuivumiskutistumasta johtuvat jännitystilat ja erityisesti poikkisuuntainen epätasainen kokonaisvenymäprofiili aiheuttavat ongelmia painokoneella ja myös tehtaalla jälkikäsittelyssä esimerkiksi pituusleikkurilla. Offset-painossa vaaditaan painopaperilta hyvää palstautumislujuutta, koska tahmea painomuste aiheuttaa paperin tarttumista painotelään nipin jättöpuolella, ja näin rainaan kohdistuu z-suuntaista kuormitusta. /10/



## 7.2 Säkkipaperi

Säkkipaperin markkinat ovat jatkuvassa muutostilassa, sillä säkkipaperille löytyy monia vaihtoehtoja esimerkiksi polymeerien suunnalta. Teollisissa sovelluksissa säkkimateriaaliin kohdistuu säkkien täyttämässä melko suurta rasitusta, mikä aiheuttaa suuria vaatimuksia säkkipaperille. Tästä syystä paperin tulisi toisaalta olla joustavaa, mutta kuitenkin plastisen muodonmuutoksen tulisi olla mahdollisimman vähäistä, jotta säkin muoto säilyisi. Lisäksi säkkipaperin ilmanläpäisevyyden tulisi olla mahdollisimman minimaalista ajatellen sekä pakkaustapahtumaa, jossa usein puhalletaan korkealla paineella materiaalia säkkiin, ja tuotteen eristämistä ympäröivässä ilmastossa mahdollisesti vallitsevasta kosteudesta. /8,10/

## 7.3 Pakkauskartonki

Tavallisimpia pakkauskartongin käyttökohteita ovat erilaiset rasiat, kotelot ja laatikot. Tärkeimpiä lujuusominaisuuksia ovat jäykkyys ja puristuslujuus, mutta myös z-suuntaisilla lujuusominaisuuksilla on merkitystä. Näistä tärkeimmät ovat palstautumisljuus ja kerrosten välinen sitoutuneisuus eli ply-bond sekä puhkaisulujuus. Kartongin viskoelastiset ominaisuudet vaikuttavat puhkaisulujuuteen, sillä kartonkiin kohtisuoraan kohdistettu paine rikkoo kartongin sen saavutettua murtovenymän. /10/

Kartongilta vaaditaan erityisesti palstautumisljuutta myös monissa jälkikäsittelevaiheissa. Offset-painatuksessa tahmeat painovärit aiheuttavat kartongin tarttumista telojen pintaan, jolloin kartonkiin syntyy z-suuntaista jännitystä ja saattaa tapahtua palstautumista. Jos taas painoväriin kuivuminen on liian nopeaa pinnan huokoisuuteen nähden, kartongin sisään syntyy höyrynpaine. Tämä aiheuttaa palstautumista, mikä näkyy kuplimisena (blistering). Offset-painatuksen lisäksi palstautumisljuutta vaaditaan myös flutingin aallotuksessa aaltokartongin valmistusprosessissa, kartonkia nuutattaessa ja muovilla päällystettäessä eli

extruusiopäälylystyksessä. Koska runkokerrokselle on melko suuret vaatimukset bulkin suhteen, kartongilta vaaditaan palstautumislujutta vain jatkokäsittelyn vaatimusten mukaisesti. /10/

## 8 Yhteenveto

Paperi käyttäytyy kuormituksen alaisena kuin viskoelastinen aine. Tämä nähdään selkeästi paperin vetolujuuskokeen pohjalta piirretyn jännitys-venymäkäyrän muodosta: aluksi elastisen venymän alueella käyrä on suhteellisen jyrkkä, tämän jälkeen käyrän kulmakerroin pienenee ja lopulta siirrytään plastisen muodonmuutoksen alueelle, minkä lopussa saavutetaan murtovenymä eli näyte katkeaa. Jännitys-venymäkäyrän muoto on koneella valmistetuilla papereilla erilainen kone- ja poikkisuunnassa. Lisäksi jännitys-venymäkäyrän muotoon vaikuttaa kuormitusnopeus, kosteus, lämpötila, massatekijät ja kuitujen sitoutuneisuus sekä paperin kuivatuskutistuma. Tason suuntaiseen venymään liittyviä ilmiötä ovat myös viruminen ja jännitetyn paperin relaxoituminen. Paperilla ja kartongilla esiintyy myös z-suuntaista venymää, mutta venymä on huomattavasti pienempää z-suunnassa kuin tason suunnassa. Z-suuntainen venymä liittyy olennaisesti paperin ja kartongin palstautumiseen.

Tasonsuuntaisen venymän mekanismista ei ole selvää, yksiselitteistä käsitystä. Mikroskooppitason tarkastelussa on havaittu useita ilmiöitä, jotka osittain selittävät jännitys-venymäkäyrän epälineaarisuutta. Yleisin teoria on, että vedonalaisen paperin kuitujen vapaiden kuitusegmenttien mutkat oikenevat, jolloin mikrokompresiot alkavat aueta ja lopulta myös kuitusidokset aukeavat. Tämä selittää hyvin plastisen muodonmuutoksen. Elastisen, ajan myötä palaavan muodonmuutoksen voidaan olettaa johtuvan vapaiden kuitusegmenttien uudelleen ”mutkalle menosta” kuituverkostoon. Z-suuntaisen venymän mekanismi on selkeämpi: z-suuntaisen voiman vaikutuksesta lyhyen elastisen venymän alueen jälkeen plastisen venymän

alueella kuitujen väliset sidokset alkavat aueta ja kuidut alkavat mahdollisesti myös irrota rakenteesta. Paperin kuituorientaatiolla on merkityksensä, koska samansuuntaisten kuitujen verkostossa kuitujen ei tarvitse katketa verkoston hajotessa.

Paperin ja kartongin venymän mittausmenetelmät usein jäljittelevät paperiin ja kartonkiin jälkikäsitelyssä ja loppukäytössä kohdistuvaa rasitusta. Mittausmenetelmät soveltuvat joko murtovenymän tai jännitys-venymäkäyrän määrittämiseen. Paperin ja kartongin venymällä on paljon merkitystä jälkikäsitelyyn, painatuksen ja tuotteiden loppukäytön kannalta. Painopapereiden reologinen käyttäytyminen vaikuttaa rainan ajettavuuteen painokoneella, minkä lisäksi erityisesti palstautumislujuudella on merkitystä off-set -painossa. Pakkauspapereiden ja -kartonkien osalta venymällä on enemmän vaikutusta loppukäytön kannalta ja esimerkiksi säkkipapereilla myös tuotteen pakkausprosessin hallittavuuden kannalta. Lisäksi kartongeilla z-suuntainen venymä ja palstautumislujuus vaikuttavat painatukseen. Paperi- ja kartonkiteollisuuden tulevaisuuden innovaatioiden kannalta paperin- ja kartongin reologisen käyttäytymisen tuntemus voi olla huomattavasti nykyistä tärkeämpää. Venymän merkitys tulee mahdollisesti korostumaan tuotteissa, joiden käyttökohteet ja jälkikäsitely sekä painatus eroavat suuresti nykyisestä.

**LÄHDELUETTELO**

1. Nordman, L., Paperin reologia ja lujuus, Paperin valmistus, Suomen paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja, kirja III, osa 1, 2.painos, Arjas, A., (toim.), Turku, 1983, s. 207 -
2. Kärenlampi, P., Niskanen, K., In-plane tensile properties, Paper Physics, Papermaking Science and Technology, Book 16, Niskanen, K. (Ed.). Fapet Oy, Jyväskylä, 1998, s. 139 – 175.
3. Niskanen, K., Rheology and moisture effects, Paper Physics. Papermaking Science and Technology, Book 16, Niskanen, K. (Ed.), Fapet Oy, Jyväskylä, 1998, s. 260 – 283.
4. Kajanto, I., Structural mechanics of paper and board, Paper Physics, Papermaking Science and Technology, Book 16, Niskanen, K. (Ed.), Fapet Oy, Jyväskylä, 1998, s. 192 – 221.
5. Levlin, J-E., General physical properties of paper and board, Pulp and Paper Testing, Papermaking Science and Technology, Book 17, Levlin, K., Söderhjelm, L. (Ed.), Fapet Oy, Jyväskylä, 1999, s.136 – 161.
6. Koskinen, K., Kehtikoski, O., Fully automatic testing of stretch and tensile strength of kraft papers, Paperi ja Puu Vol. 74 (1992)5, s. 400 – 401.
7. Fellers, C., Girlanda, O., Evaluation of the tensile stress-strain properties in the thickness direction of paper materials, Nordic Pulp and Paper Research Journal Vol. 22 (2007)1, s. 49 – 56.

8. Averheim, A., Höglund, H., Petterson, G., Sjöberg, J.C, Wågberg, L., Increased joint-forming ability of ductile kraft pulp fibres by polyelectrolyte multilayer treatment – Influence of refining and drying strategies, Nordic Pulp and Paper Research Journal Vol 22 (2007)2, s. 228 – 235.
  
9. Suontausta, O., End-use properties of printing papers. Pulp and Paper Testing, Papermaking Science and Technology, Book 17, Levlin, K., Söderhjelm, L. (Ed.). Fapet Oy, Jyväskylä, 1999, s.184 – 215.
  
10. Kainulainen, M., Söderhjelm, L., End-use properties of packaging papers and boards. Pulp and Paper Testing, Papermaking Science and Technology, Book 17, Levlin, K., Söderhjelm, L. (Ed.), Fapet Oy, Jyväskylä, 1999, s. 217 - 231.