

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

HIILETYSTERÄS- JA POLYMEERILIERIÖHAMMASPYÖRIEN MITOITUKSEN VER-
TAILU
COMPARING THE DESIGN OF CASE HARDENED STEEL AND POLYMER SPUR
GEARS

Lappeenranta

30.03.2015

Juha-Matti Smolander

Työn tarkastaja:

Dosentti Harri Eskelinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Smolander Juha-Matti Petteri

Hiiletysteräs- ja polymeerilieriöhammaspyörien mitoituksen vertailu

Kandidaatintyö

2015

31 sivua, 11 kuvaa, 3 taulukkoa, 0 liitettä

Tarkastaja: Dosentti Harri Eskelinen

Hakusanat: hiiletysteräs, HP-polymeeri, high performance -polymeeri, lieriöhammaspyörä, polymeerihammaspyörä, mitoitus

Tässä työssä vertailtiin hiiletysteräksisten ja polymeeristen lieriöhammaspyörien mitoitusta. Työssä selvitettiin kirjallisuustutkimuksen keinoin merkittävimmät erot mitoittaessa hammaspyöriä hiiletysteräksistä ja polymeereistä.

Työssä keskityttiin erityisesti materiaaliominaisuuksiltaan kehittyneempiin niin kutsuttuihin high performance -polymeereihin. High performance -polymeerit ovat useilta materiaaliominaisuuksiltaan perinteisiä koneenrakennusmuoveja kehittyneempiä. Työssä käytiin läpi polymeerien mitoitukseen vaikuttavat keskeiset materiaaliominaisuudet.

Polymeerihammaspyörien mitoitusohjeita verrattiin vielä kirjoitushetkellä voimassa olleeseen SFS 4790 (1984) -standardiin. Työssä todettiin polymeerilieriöhammaspyörien ja hiiletysteräshammaspyörien mitoituksen suurimman eron tulevan polymeerien voimakkaasti lämpötilariippuvaisista materiaaliominaisuuksista. Lisäksi työssä todettiin polymeerien materiaaliominaisuuksien vaikuttavan mitoituksen lisäksi muihin suunnitteluparametreihin, kuten kuormituksen tyyppiin ja erityisesti käyttölämpötilaan.

Työssä todettiin polymeerien materiaaliominaisuuksista olevan taulukkotietoa saatavilla rajoitetusti, tai sen löytäminen todettiin hankalaksi. Lisäksi työssä todettiin ettei polymeerihammaspyörien mitoituksesta ole olemassa standartoitua tai vakiintunutta ohjeistusta. Työssä todettiin myös polymeerien valmistustekniikoiden mahdollistavan hammaspyörästandardista poikkeavat hammasprofiilit ja ryntökulmat hammaspyörän muodon optimoimiseksi. Standardista poikkeavilla hammaspyöräprofiileilla standardin SFS 4790 (1984) mukaisten laskentatapojen soveltaminen suoraan ei ole mahdollista.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLIT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	6
1.1	Tutkimuksen tavoite, tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset.....	6
1.2	Odotettavissa olevat tulokset	7
2	HAMMASPYÖRÄT	8
2.1	Suorahampaiset lieriöhammaspyörät.....	10
2.1.1	Suorahampaisen lieriöhammaspyörän geometria.....	11
2.1.2	Teräksisen lieriöhammaspyörän lujuuslaskenta.....	12
3	TERÄKSISET LIERIÖHAMMASPYÖRÄT	14
3.1	Hiiletysteräkset	14
3.2	Hiiletysteräksisen hammaspyörän mitoitus	16
4	POLYMEERILIERIÖHAMMASPYÖRÄT	18
4.1	High Performance -polymeerit.....	18
4.1.1	Polyeetterieetteriketoni (PEEK).....	19
4.1.2	Polyasetaali (POM)	19
4.1.3	Termoplastinen polyimidi (PI).....	19
4.1.4	Polyeetterisulfoni (PES).....	19
4.1.5	High Performance -polymeerien materiaaliominaisuuksien vertailu.....	20
4.2	Polymeerien mekaaniset ominaisuudet.....	20
4.3	Polymeerihammaspyörän mitoitus	23
5	TULOKSET.....	24
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	26
	LÄHTEET.....	27

SYMBOLIT JA LYHENTEET

α	ryntökulma (°)
β	vinouskulma (°)
σ_b	taivutusjännitys (Pa)
σ'_b	suurin sallittu taivutusjännitys ideaaliolosuhteissa (Pa)
σ_{Flim}	taivutusväsymislujuus (Pa)
σ_{Hlim}	Hertzin pintapaine/vierintäväsymislujuus (Pa)
ω	kulmanopeus (rad/s)
ω_1	käyttävän pyörän kulmanopeus (rad/s)
ω_2	käytettävän pyörän kulmanopeus (rad/s)
b	hampaan leveys (mm)
C_s	käyttöaikakerroin
d	jakohalkaisija (mm)
d_1	pienen pyörän jakohalkaisija
d_a	päähalkaisija (mm)
d_b	perushalkaisija (mm)
d_f	tyvihalkaisija (mm)
E	kimmokerroin (Pa)
F	voima (N)
h	hampaan korkeus (mm)
h_a	pääkorkeus (mm)
h_f	tyvikorkeus (mm)
i	välityssuhde (-)
J_{hp}	hitausmassa (mk g ²)
K_A	käyttökerroin
$K_{F\alpha}$	kuormituksen jakautumiskerroin
$K_{H\alpha}$	kuormituksen jakautumiskerroin
$K_{H\beta}$	kosketusleveyskerroin
K_L	voiteluainekerroin
K_M	materiaalikerroin
K_T	lämpötilakerroin
K_V	dynaaminen kerroin/nopeuskerroin
m	moduuli (mm)

m_{hp}	hammaspyörän massa (kg)
m_n	normaalimoduuli (mm)
n	pyörimisnopeus (r/min)
n_1	käytettävän pyörän pyörimisnopeus (r/min)
n_2	käytettävän pyörän pyörimisnopeus (r/min)
P	käytettävän koneen nimellisteho (kW)
P_F	nimellisteho (W)
P_{HP}	nimellisteho (W)
p	jako (-)
S_c	Hertzin pintapaine (Pa)
S_{Fli}	tyvilujuuden varmuusluku
S_{Hmin}	hampaan kyljen vierintälujuuden varmuusluku
u	hammasluku
x	profiilinsiirtokerroin (-)
Y_β	hampaan sisäänajon vaikutuskerroin
Y_ϵ	ryntösuhdekerroin
Y_{arelT}	suhteellinen loviherkkyyysluku
Y_{Fa}	hampaan muotokerroin
Y_{NT}	kestoikäkerroin
Y_{RrelT}	suhteellinen pinnankarheuskerroin
Y_{Sa}	jännityksen korjauskerroin
Y_{ST}	jännityksen korjauskerroin
Y_X	koon vaikutuskerroin
z	hammasluku(-)
z_1	pienen pyörän hammasluku
Z_β	vinouskulmakerroin
Z_ϵ	ryntösuhdekerroin
Z_E	joutokerroin
Z_H	kyljen muotokerroin
Z_L	voiteluainekerroin
Z_N	kestoikäkerroin
Z_V	nopeuskerroin
z_{v1}	reduoitu hammasluku
Z_W	muokkauslujittumiskerroin
Z_X	koon vaikutuskerroin

1 JOHDANTO

High performance -polymeerien ominaisuudet ovat parantuneet merkittävästi viimeisten kymmenen vuoden aikana. Esimerkiksi eräät PI-, PEEK-, POM- ja PES-laadut sopivat hammaspyörämateriaaliksi vaativissakin kohteissa ja niillä voidaan ajatella korvattavaksi teräs- hammaspyöriä. HP-polymeerit ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan, lämpötilan kestoaltaan ja kemialliselta kestoaltaan perinteisiä koneenrakennusmuoveja parempia. Polymeerien käyttöä hammaspyörän valmistusmateriaalina voidaan perustella polymeerien pienemmällä tiheydellä ja näin ollen kevyemmällä pyörivillä massoilla. Lisäksi polymeerien vaimennusominaisuudet ovat yleensä teräksiä paremmat ja polymeerihammaspyöriä käyttämällä voidaan saada aikaan hiljaisempi käynti.

1.1 Tutkimuksen tavoite, tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Kandidaatin työn tavoite on vertailla hiiletysteräs- ja polymeerihammaspyörien materiaalilähtöisiä mitoituskriteereitä ja löytää syitä mitoituskriteerien välisiin eroihin. Työ perustuu kirjallisuustutkimukseen. Lähteinä käytetään tieteellisiä julkaisuja SCOPUS - tietokannasta vuosilta 2005 - 2015 sekä hammaspyörästandardeja ja koneensuunnittelun peruslähdeksiä.

Polymeerien materiaaliominaisuudet ovat monilta osin lämpötilariippuvaisia, jonka vuoksi muovisten hammaspyörien mitoitusyhtälöt on sidottu lämpötilatarkasteluihin. Tärkeimmät lämpötilariippuvat polymeerien materiaaliominaisuudet ovat:

- Lasimuutoslämpötila
- Sulamislämpötila
- Muodonpysyvyyslämpötila
- Prosessointilämpötila
- Hajoamislämpötila
- Korkein käyttölämpötila
- Virumislujuus tietyssä lämpötilassa
- Väsymislujuus lämpötilan funktiona

Huomio kiinnittyy erityisesti HP-polymeerien materiaaliominaisuuksiin.

Hiiletysteräspyörillä hammaspyörien mitoitus perustuu hampaan sisäpuolisen osan lujuus/ sitkeysominaisuuksien yhdistämiseen halutun hampaan pintakovuuden kanssa.

Tehonsiirron laskenta perustuu tästä syystä hampaan tyvilujuuden ja pintapaineen mukaisiin laskentoihin.

Koska hallittavia parametreja on paljon ja tutkittavien materiaalien käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi toisistaan, on tarpeen tehdä analyttinen mitoitustapojen vertailu.

Tutkimusongelmasta johdetut tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Poikkeavatko polymeerihammaspyörän mitoituskriteereiksi valittavat kuormitukset hiiletysteräspyörille asetetuista kriteereistä (tyvilujuus ja pintapaine), ja jos poikkeavat, niin miten?
- Mikä on mahdollinen teho- ja pyörimisnopeusalue, jolla polymeerihammaspyörät ovat vaihtoehtoisia hiiletysteräspyörien kanssa?
- Kuinka suuri ero on samaan käyttökohteeseen sopivien polymeeristen ja hiiletysteräksisten hammaspyörien kestoiällä ja miten mitoitustavat eroavat toisistaan?
- Kuinka paljon hitausmassat muuttuvat samaan käyttökohteeseen sopivien hiiletysteräspyörien korvaamisella polymeeripyörillä?

1.2 Odotettavissa olevat tulokset

Kandidaatintyö tuottaa vertailutietoa samaan käyttökohteeseen soveltuvien polymeeristen ja teräksisten lieriöhammaspyörien mitoituksesta. Tuotettavaa tietoa voidaan hyödyntää hammasvaihteiden suunnittelussa sekä arvioitaessa kunnossapidon näkökulmasta polymeerisen varaosan käyttömahdollisuuksia.

Työssä rajoitutaan suoramampaisten lieriöhammaspyörien mitoituskriteerien vertailuun ja teräksisistä tavallisista hammaspyörämateriaaleista käsitellään vain hiiletysteräksiä.

2 HAMMASPYÖRÄT

Hammaspyörät ovat mekaanisen voiman siirtoon tarkoitettuja kone-elimiä. Hammaspyörillä välitetään pyörivää liikettä akselien välillä. Hammaspyörät ovatkin yksi ihmiskunnan vanhimmista keksinnöistä. Kiinalaisten tiedetään käyttäneen hammaspyöriä jo 2600 eaa., Aristoteles kirjoitti neljä vuosisataa ennen ajanlaskun alkua hammaspyöristä arkipäiväisinä asioina ja Leonardo da Vinci suunnitteli 1400-luvulla joukon keksintöjä, jotka sisälsivät hammas- pyöriä. (Juvinal & Marshek, 1999, s. 619.) Kuvassa 1 primitiivisiä hammaspyöriä Pantigo Mill -tuulimyllystä, joka sijaitsee East Hamptonin kaupungissa Suffolkin piirikunnassa New Yorkissa (Historic American Buildings Survey). Hammaspyöriä on siis käytetty jopa vuosituhansien ajan. Kuvan 1 hammaspyörä on valmistettu puusta ja läpi historian hammaspyörien valmistusmateriaaleina on pyritty käyttämään lähes kaikkia saatavilla olevia materiaalivehtoehtoja.



Kuva 1. Primitiivisiä hammaspyöriä Pantigon tuulimyllystä (Historic American Buildings Survey).

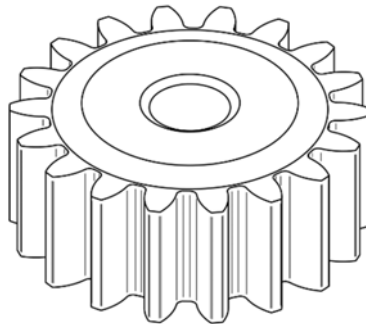
Verrattuna muihin voimansiirtotapoihin, kuten hihna- tai ketjuvälityksiin, ovat hammaspyörät yleisesti vakaimpia ja kestävimpiä. Hammaspyörillä voidaan myös saavuttaa jopa 98 % hyötysuhde tehonsiirrossa. Toisaalta suurten nopeuksien ja kuormien, sekä hiljaisen käynnin vaatimat tarkkuudet nostavat hammaspyörien hintaa verrattuna ketju- tai hihnakäyttöihin. (Juvinall & Marshek, 1999, s. 619.)

Pyörimisliikkeen lisäksi hammaspyöriä voidaan käyttää muuttamaan pyörimisliike rajoitetuksi lineaariliikkeeksi tai lineaariliike rajallisella kulma-alueella tapahtuvaksi pyörimisliikkeeksi. Tällöin on käytettävä hammaspyörä-hammastanko -paria. (Airila et al., 2009, s. 490.)

Yleisin hammaspyörätyyppi on lieriöhammaspyörä (kuva 2). Lieriöhammaspyörä voi olla suorahampainen, jolloin hampaat ovat hammaspyörää käyttävän akselin suuntaiset, tai vino- hampainen. Lieriöhammaspyörän lisäksi muita hammaspyörätyyppejä ovat:

- Sisähammastettu lieriöhammaspyörä
- Kartiohammaspyörä
- Ruuvipyörä
- Kierukka ja kierukkapyörä

(Airila et al., 2009, s. 490.)



Kuva 2. Lieriöhammaspyörä (Inductiveload, 2007).

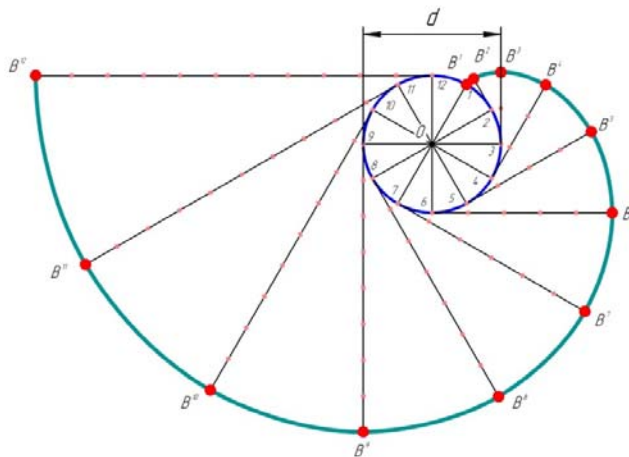
Tässä työssä käsitellään suorahampaisten lieriöhammaspyörien mitoitus. Lieriöhammaspyörien lujuuslaskenta perustuu standardiin SFS 4790 (1984) ja geometrinen arvojen laskenta standardiin SFS 3389 (1975). Molempia edellä mainittuja standardeja, sekä kaikkia muita SFS hammaspyörästandardeja, on esitetty kumottavaksi (Karppinen, 2014).

2.1 Suorahampaiset lieriöhammaspyörät

Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, ovat suorahampaiset lieriöhammaspyörät yleisimmin käytettyjä hammaspyöriä ja tässä työssä keskitytään siksi suorahampaisten lieriöhammaspyörien mitoitukseen. Seuraavaksi käydään läpi evolventtihammaspyörän geometrian laskeminen, lujuuslaskenta sekä voimatarkastelu ja tehonsiirto. Airilan et al. (2009) mukaan kinemaattisesti tarkasti toimiva hammasmuotoja on useita, mutta näistä tärkeimmät ovat evolventti ja sykloidi. Evolventista on tullut paras hammasmuoto sen valmistuksen helppouden, laadunvalvonnan tarkasteltavuuden takia. Evolventtihammastus myös sallii pienen heiton akselivälissä ilman välityssuhteen muutosta.

Teräksisten lieriöhammaspyörien geometria on määritelty standardissa ja erikoisempien geometrioiden valmistaminen ei ole järkevää, koska uusi geometria tarvitsee uudet työkalut. Muovihammaspyörien geometria on valmistusteknisistä syistä helpompaa ja halvempaa muokata standardista poikkeavaksi. Valamalla voidaan valmistaa suhteellisen edukkaasti erikoisempiakin muotoja.

Airilan et al. (2009, s. 494) mukaan "Evolventti syntyy suoran vieressä liukumatta ympyrän kehällä. Tällöin suoran jokainen piste piirtää evolventtikäyrää. Havainnollisesti evolventti voidaan piirtää kiekon avulla, jonka kehälle on kierretty lankaa. Kelattaessa lankaa auki siten, että se pysyy koko ajan kireänä, piirtää langan päätepiste evolventin." Kuvassa 3 on esitetty evolventin syntyperiaate.



Kuva 3. Evolventin syntyperiaate (Raysper, 2006).

2.1.1 Suorahampaisen lieriöhammaspyörän geometria

Hammaspyörän geometrian perustan luovat moduuli (m), ryntökulma (α) ja hammasluku, eli hampaiden lukumäärä, (z).

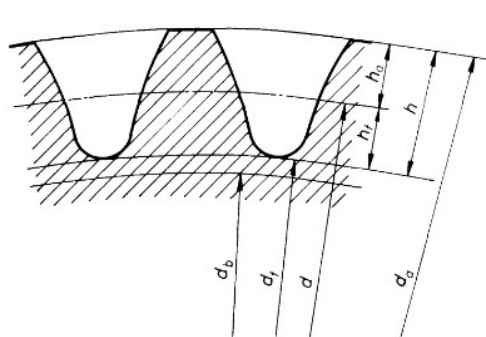
$$z\rho = \pi d \quad (1)$$

, jossa d on jakohalkaisija ja p on jako. Jako on kahden peräkkäisen hampaan samasta kyljestä samaan kylkeen mitattu kaarimitta jakohalkaisijaa pitkin. Hammaspyörän moduuli (m) on jakohalkaisijan (d) ja hammasluvun (z) suhde, moduulin yksikkö on millimetri. Moduulit on standardoitu standardissa SFS 3093. (Airila et al., 2009, s. 495–496.) Hammaspyörien geometrinen pääarvojen laskenta on esitetty standardissa SFS 3389 (1975). Taulukkoon 1 on kerätty standardin mukaiset hammaspyörän geometrinen pääarvojen laskentakaavat ulkohammastetuille hammaspyörille.

Taulukko 1. Hammaspyörän geometrinen pääarvojen laskenta (SFS 3389, 1975, s. 1).

Nimi	Kaava
Jakohalkaisija	$d = m * z$
Perushalkaisija	$d_b = d * \cos\alpha$
Jako	$p = m * \pi$
Hampaan korkeus	$h = 2,25m - \Delta h_a$
Pääkorkeus	$h_a = m(1 + x) - \Delta h_a$
Tyvikorkeus	$h_f = m(2,25 - x)$
Päähalkaisija	$d_a = d + 2h_a$
Tyvihalkaisija	$d_f = d - 2h_f$

Pää- ja tyvikorkeuden kaavassa mainittu x on profiilinsiirtokerroin, jota tarvitaan akselivälin siirtoon (Airila et al., 2009, s. 498). Geometrisiä mittoja on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Evolventtihammastuksen geometrisiä mittoja (SFS 3389, 1975, s. 2).

Ryntökulma (α) on kulma joka muodostuu ryntösuoran ja vierintäpisteen tangentin väliin. Ryntösuora on suora, jonka hampaiden kosketuspiste piirtää hammaspyörää pyöritettäessä. Yleensä lieriöhammaspyörien ryntökulma on 20° . Jako- ja perushalkaisijat määräytyvät akselivälin, ryntökulman ja välityssuhteen mukaan. (Airila et al., 2009, s. 495) Välityssuhde (i) on hammaspyöräparin kulmanopeuksien (ω) ja pyörimisnopeuksien (n) suhde. (Budynas & Nisbett, 2011, s. 679)

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

, jossa ω_1 on käytävän pyörän kulmanopeus, ω_2 on käytettävän pyörän kulmanopeus, n_1 on käytävän pyörän pyörimisnopeus ja n_2 on käytettävän pyörän pyörimisnopeus.

Yhtenä tutkimuskysymyksenä esitettiin hammaspyörien hitausmassojen tarkastelu. Hammaspyörän hitausmomentti voidaan laskea suoran ympyräsilinterin hitausmomentin kaava käyttäen. Hammaspyörän hitausmomentti (Valtanen, 2012, s. 405):

$$J_{hp} = \frac{1}{2} m_{hp} d^2 \quad (3)$$

, jossa m_{hp} on hammaspyörän massa.

2.1.2 Teräksisen lieriöhammaspyörän lujuuslaskenta

Standardissa SFS 4790 (1983) esitetään teollisuushammasvaihteiden tehonsiirtokyvyn laskeminen hampaan kyljen vierintäväsytymisen ja tyven taivutusväsytymisen suhteen. Standardi sisältää rajoituksia, mm ryntökulma on rajoitettu 20° :een. Lähtöarvoina hammaspyörän lujuuslaskentaan tarvitaan: hammastuksen tiedot, terän profiili, suunnittelu ja valmistus, sekä kuormitustiedot. Suunnittelu ja valmistus pitävät sisällään tiedot käytetystä materiaalista, hammastamistarkkuudesta ja pyörien sijainnin laakereihin nähden. Kuormitustiedot tarkoittavat käyntitehoa, pyörimisnopeutta (n_1), sekä käytettävää ja käyttävää konetta. (SFS 4790, 1983, s. 2-3.)

Standardin SFS 4790 (1983, s. 24) mukaan laskenta tyvilujuuden mukaan: "Hampaan tyvilujuuden salliman kantokyvyn mukainen laskenta perustuu paikalliseen tyvijännitykseen, joka muodostuu hammasvoiman kuormittaessa hammasta sen uloimmassa yksittäisryntöpisteessä. Tyvijännitykset ja varmuusluvut lasketaan pienelle ja isolle pyörälle erikseen." Pintapaineen mukainen laskenta puolestaan perustuu Hertzin pintapaineen laskemiseen vierintäympyrälle tai erityistapauksissa yksittäisryntöpisteeseen. Käyttävän ja

käytettävän pyörän pintapaineet ja varmuusluvut lasketaan erikseen. (SFS 4790, 1983, s.14)

Standardissa SFS 4790 (1983) on esitetty myös nimellistehon laskenta sekä pintapaineen, että tyvilijuuden mukaan. Nimellistehon laskenta pintapaineen mukaan, kun pienen pyörän redusoitu hammasluku on $z_{v1} \geq 20$ (SFS 4790, 1983, s. 37):

$$P_{HP} = 52,4 * 10^{-9} \frac{u}{u+1} * n_1 * d_1^2 * b * \left(\frac{Z_L * Z_V * Z_R * Z_X * Z_N * \sigma_{Hlim} * Z_W}{Z_H * Z_E * (Z_\epsilon * Z_\beta) * S_{Hmin}} \right)^2 * \frac{1}{K_V * K_{H\beta} * K_{H\alpha}} \geq K_A * P \quad (3)$$

, jossa u on hammaslukusuhte, n_1 pienen pyörän pyörimisnopeus, d_1 pienen pyörän jakohalkaisija, b hampaan leveys, Z_L voiteluainekerroin, Z_V nopeuskerroin, Z_X koon vaikutuskerroin, Z_N kestoikäkerroin, σ_{Hlim} vierintäväsymislujuus, Z_W muokkauslujittumiskerroin, Z_H kyljen muotokerroin, Z_ϵ joustokerroin, Z_α ryntösuhdekerroin, Z_β vinouskulmakerroin, S_{Hmin} hampaan kyljen vierintälujuuden varmuusluku, K_V dynaaminen kerroin, $K_{H\beta}$ kosketusleveyskerroin, $K_{H\alpha}$ kuormituksen jakautumiskerroin, K_A käyttökerroin ja P käytettävän koneen teho.

Nimellistehon laskenta tyvilijuuden mukaan (SFS 4790, 1983, s. 37)

$$P_{FP} = 52,4 * 10^{-9} * b * n_1 * m_n^2 * z_1 * S_{Fmin} * \frac{\sigma_{Flim} * Y_{ST} * Y_{NT} * Y_{\delta relT} * Y_{RrelT} * Y_X}{(Y_{Fa} * Y_{Sa}) * (Y_\epsilon * Y_\beta) * \cos(\beta) * K_V * K_{F\beta} * K_{F\alpha}} \geq K_A * P \quad (4)$$

, jossa m_n on normaalimoduuli, z_1 pienen pyörän hammasluku, S_{Fmin} hampaan tyvilijuuden varmuusluku, σ_{Flim} hampaan tyven väsymislujuus, Y_{ST} jännityksen korjauskerroin, Y_{NT} kestoikäkerroin, $Y_{\delta relT}$ suhteellinen loviherkkyyysluku, Y_{RrelT} suhteellinen pinnankarheuskerroin, Y_X koon vaikutuskerroin, Y_{Fa} hampaan muotokerroin, Y_{Sa} jännityksen korjauskerroin, Y_α ryntösuhdekerroin, Y_β hampaan sisäänajon vaikutuskerroin, β vinouskulma, $K_{F\beta}$ kosketusleveyskerroin ja $K_{F\alpha}$ kuormituksen jakautumiskerroin.

Kaavoissa 4 ja 5, sekä standardista SFS 4790 (1983) löytyvistä suurimman sallitun tyven taivutusjännityksen ja pintapaineen laskennassa esiintyvistä kertoimista tässä työssä kiinnostavat materiaaliominaisuuksista voimakkaimmin riippuvat. Osa kertoimista on riippuvaisia hammaspyörän geometriasta sekä käytettävästä ja käytävästä koneesta. Materiaaliominaisuuksista riippuvat kertoimet on teräspyörille esitetty standardissa, polymeerihammaspyörille nämä joudutaan selvittämään muualta.

3 TERÄKSISET LIERIÖHAMMASPYÖRÄT

Tyypillisiä hammaspyörissä käytettäviä teräksiä ovat nuorrutusteräksset (Raaka-ainekäsikirja 1, 2001, s. 112; Airila et al., 2009, s. 112) ja hiiletysteräksset (Raaka-ainekäsikirja, s. 186; Airila et al., 2009, s. 114). Airilan et al. (2004, s. 117-118) mukaan hammaspyöriä voidaan valmistaa myös valuteräksistä ja -raudoista.

Koska hammaspyörän lujuuslaskentakin perustuu hampaan tyvilujuuden ja hampaan kyljen pintapaineen mukaiseen laskentaan voidaankin siis todeta, että hammaspyörämateriaalilta vaaditaan hyvää pintakovuutta, sitkeyttä ja lujuutta. Kohteissa, joissa vaaditaan staattista lujuutta, väsymislujuutta ja sitkeyttä voidaan käyttää nuorrutusteräksiä. Nuorrutuksen jälkeen nuorrutusteräksen mikrorakenne on sitkeä päästömartensiittinen. (Raaka-ainekäsikirja 1 2001, s. 112) Hiiletysteräksset soveltuvat kohteisiin, joissa vaaditaan kulutusta hyvin kestävää pintaa, väsymislujuutta, sekä lujaa ja sitkeää sisusta. Hiiletysteräksen pinta on hiiletys- karkaisun jälkeen kova. Pintaan muodostuu runsaasti hiiltä sisältävä martensiittinen kerros. (Raaka-ainekäsikirja, 2001, s. 186.)

Tässä työssä keskitytään hiiletysteräksiin. Erityisesti tarkastellaan hammaspyörän mitoitukseen vaikuttavia hiiletysterästen materiaaliominaisuuksia.

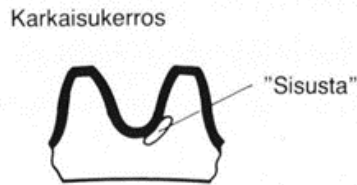
3.1 Hiiletysteräksset

Hiiletysteräksset ovat standardin SFS-EN 10084 (2008, s. 8) mukaan; "teräksiä, joiden hiilipitoisuus on suhteellisen alhainen ja jotka on tarkoitettu karkaistaviksi hiiletysten ja tyyppihiiletysten jälkeen." Hiiletysteräksset sisältävät hiiltä noin 0,15 - 0,25 % sekä 0,5 - 1,2 % mangaania. Karkenevuuden lisäämiseksi teräkseen lisätään seosaineksi esimerkiksi kromia, nikkeliä ja molybdeeniä. (Raaka-ainekäsikirja, 2001, s. 186) Cr-Mo tai Cr-Mn-teräksiä voidaan käyttää kohteissa, joissa kappale joutuu väsyttävän veto-, puristus-, taivutus-, tai vääntöjännityksen alaiseksi. Erityisen vaativissa kohteissa voidaan käyttää sitkeitä Ni-, Cr-Ni- tai Cr-Ni-Mo-teräksiä. (Sten, 2015) Taulukossa 2 esitetty Suomessa käytetyimmät hiiletysteräksset ja niiden Ovakon vastaavat tunnuksset. Taulukosta nähdään, että erilaatuisia hiiletysteräksiä on hyvin saatavilla.

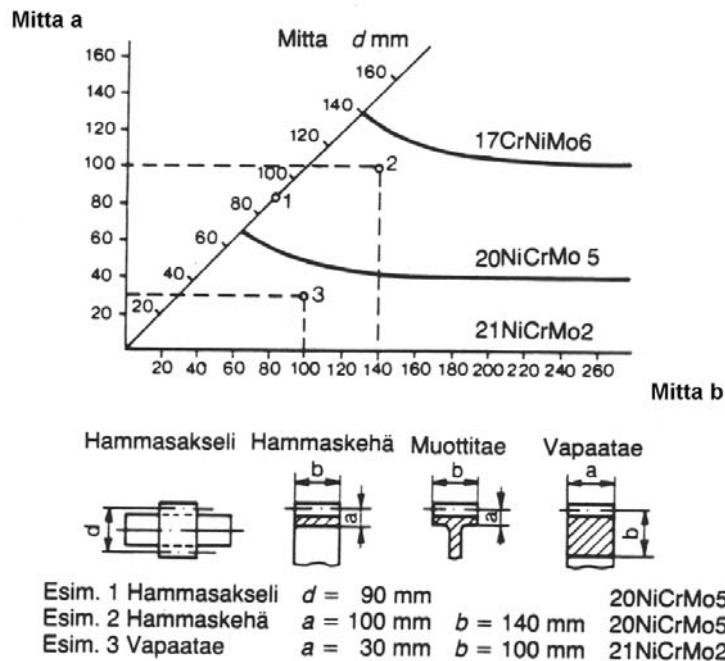
Taulukko 2. Käytetyimmät hiiletysteräkset (Raaka-ainekäsikirja, 2001, s. 187).

SFS-EN 10084	Ovako
20MnCr5	Imatra MC 212 M
20NiCrMo2-2	Imatra MoCN 206 M
17NiCrMo6-4	Imatra MoCN 212 M
18CrNiMo7-6	Imatra MoCN 216 M

Hiiletysteräksen valintaan vaikuttavat erityisesti kohteen asettamat väsymislujuusvaatimukset. Hiiletysteräksiltä vaaditun väsymislujuuden saavuttamiseen vaikuttavat erityisesti hampaan pinnan ja sisustan karkenevuus. Hammaspyörän hampaan sisusta on esitetty kuvassa 5. Teräksen valinta voidaan tehdä myös karkenevuuden perusteella, kuvassa 6 esitetty karkenevuuteen perustuva valintakäyrästä hiiletysteräksille. Käyrästä voidaan valita käytettävä hiiletysteräs hammaspyörän muodon ja mittojen perusteella. (Raaka-ainekäsikirja, 2001, s. 194.)



Kuva 5. Hammaspyörän hampaan sisusta (Raaka-ainekäsikirja, 2001, s. 202).

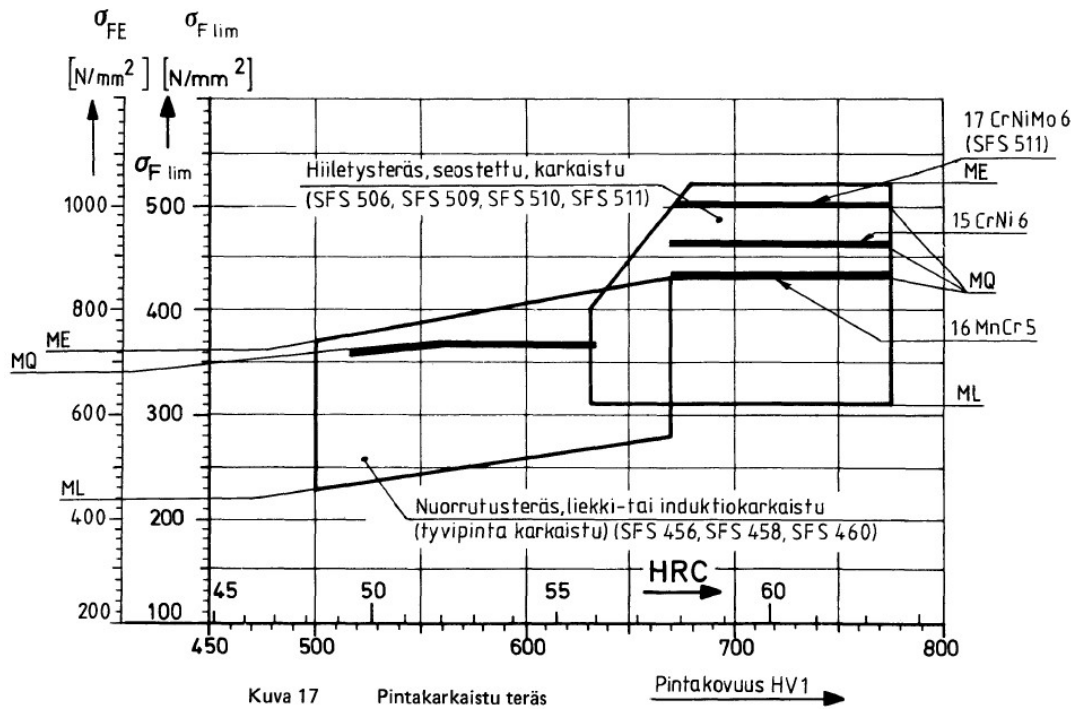


Kuva 6. Hiiletysterästen valintakäyrästä (Raaka-ainekäsikirja, 2001, s. 194).

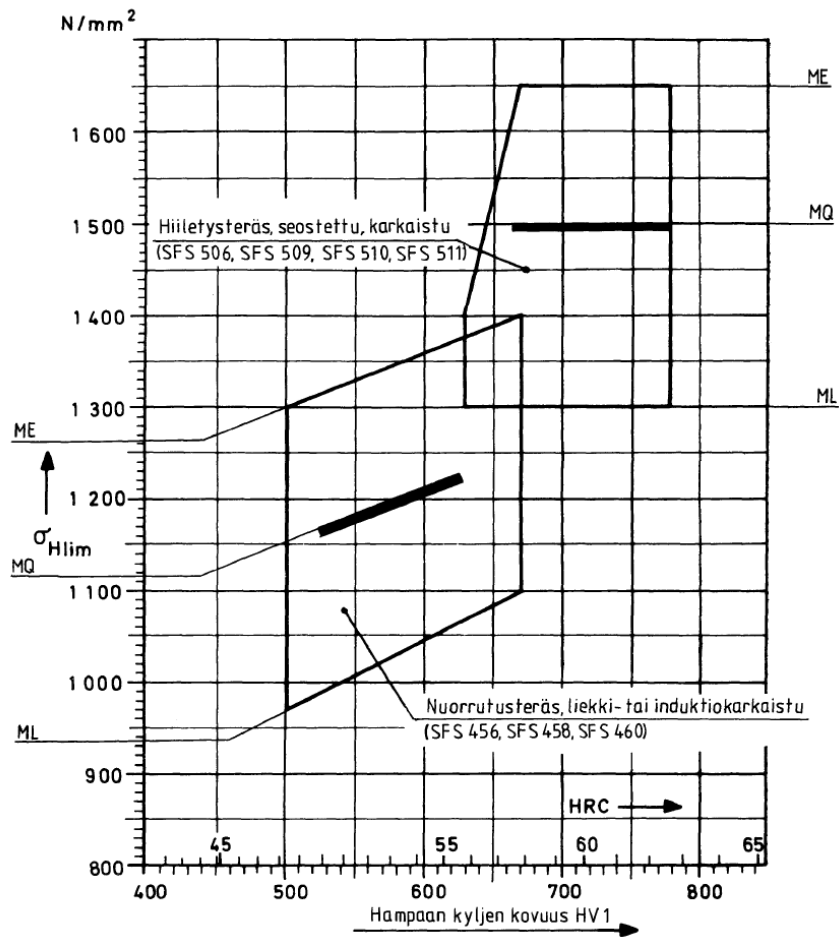
3.2 Hiiletysteräksisen hammaspyörän mitoitus

Hiiletysteräksisen hammaspyörän laskenta tapahtuu standardin SFS 4790 mukaisesti. Kaavoissa 4 ja 5 esiintyvät tyven taivutusväsymislujuus $\sigma_{F\text{lim}}$ (kuva 7) ja Hertzin pintapaine $\sigma_{H\text{lim}}$ (kuva 8) valitaan laatuvaatimusten mukaan. Laatuvaatimukset ovat Raaka-ainekäsikirjan (2001, s. 132) mukaan:

- "ML: Teräksen ja lämpökäsittelyn vähimmäisvaatimus.
- MQ: Laatuvaatimus, jonka kokeneet teollisuusvaihteiden ja suuren kehänopeuden hammasvaihteiden valmistajat pystyvät täyttämään kohtuullisin kustannuksin.
- ME: Teräksen ja lämpökäsittelyn laatuvaatimus, kun pyritään saavuttamaan suurin tehonsiirtokyky."



Kuva 7. Hampaan tyven taivutusväsymislujuus (SFS 4790, 1983, s. 30).



Kuva 8. Hampaan kyljen vierintäväsymislujuus (SFS 4790, 1983, s. 20).

Taivutusväsymislujuutta ja vierintäväsymislujuutta tarvitaan myös laskettaessa standardin mukaisesti sallittua Hertzin pintapainetta (SFS 4790, 1983, s. 15) ja hampaan sallittua tyvijännitystä (SFS 4790, 1983, s. 24). Hiiletysteräksisen hammaspyörän mitoitus korostaa karkenevuuden, tyven taivutuslujuuden ja pinnan vierintäväsymisen yhteensovittamista.

4 POLYMEERILIERIÖHAMMASPYÖRÄT

Polymeerihammaspyörät ovat jo jonkun aikaa korvanneet metallisia hammaspyöriä sovelluksissa, joissa tehonsiirtokyvyn tai pyörimisnopeuden ei tarvitse olla kovin suuri. Polymeerien materiaalikehityksen johdosta polymeerien mekaaniset ominaisuudet ovat parantuneet ja polymeereillä voidaan korvata metallisia hammaspyöriä yhä vaativimmissa kohteissa. (Davis, 2005, s. 79.)

Perinteisesti hammaspyörissä käytettyjä polymeerejä ovat polyamidit, eli nylon, ja asetaali. Näitä polymeerejä on käytetty pitkään mm; tuulilasinpyyhkijöissä, nopeusmittareissa, pumpuissa, kelloissa, kopiokoneissa ja lasertulostimissa. (Davis, 2005, s. 80)Tässä työssä esitellään kuitenkin uudempia ja kehittyneempiä polymeerejä, niin kutsuttuja high performance - polymeerejä (HP-polymeerit). High performance -polymeerien materiaaliominaisuudet ovat parempia, kuin perinteisten koneenrakennusmuovien ja siksi tässä työssä halutaan keskittyä niiden ominaisuuksiin.

4.1 High Performance -polymeerit

Yleisistä koneenrakennus polymeereistä erotetaan omaksi ryhmäkseen HP-polymeerit. HP- polymeerien tunnusomaisena piirteenä ovat niiden erinomaiset materiaaliominaisuudet verrattuna tavanomaisiin koneenrakennuspolymeereihin. Esimerkiksi korkeampi käyttölämpötila, suurempi lujuus, suurempi kulutuksen kestävyys tai erinomainen kemikaalien kesto. (Strong, 2000, s. 252.)

HP-polymeerit ovat yleensä aromaattisen renkaan (bentseenirenkaan) sisältäviä polymeerejä. Bentseenirenkaan ansiosta näillä polymeereillä on yleensä korkea lujuus, korkea lämpö- tilan sieto, yleensä suuri iskulujuus, hyvä tulen kesto ja kohtalaisen hyvä liuotinten sieto. (Strong, 2000, s. 252.)

HP-polymeerejä käytetään usein pohjana komposiittimateriaaleille. Komposiittimateriaalissa hp-polymeeriä ja pitkäkuituista materiaalia (lasi- tai hiilikuitua) sekoitetaan keskenään. High performance -kestomuovikomposiitit kilpailevat kertamuovikomposiittien kanssa avaruus, huippu-urheilu ja lääketieteen sovellusten alalla. (Strong, 2000, s. 252.) Seuraavassa kappaleessa esitellään eräitä hammaspyörämateriaaleiksi sopivia HP-polymeerejä.

4.1.1 Polyeetterieetteriketoni (PEEK)

Polyeetterieetteriketoni (PEEK) on erittäin kulutuksen- ja kemikaalinkestävä muovi. PEEK kestää käyttöä jopa 250 °C lämpötiloissa ja sillä on erinomainen gammasäteilyn ja höyryn kesto. PEEK:lla on huono palavuus ja hyvät sähköeristysominaisuudet. (Fluorotech, 2015.)

PEEK:ia käytetään yleisesti muovikomposiiteissa. PEEK:iin sekoitetaan hiili- tai lasikuitua ominaisuuksien parantamiseksi. Täyteaineena voidaan käyttää myös lasia, grafiittia tai teflonia. Lasikuitulisäys tuo materiaalille pienemmän lämpölaajenemisen, suuremman taivutusjäykkyyden ja paremman puristuslujuuden. Hiilikuidulla saadaan parannettua puristuslujuutta ja lämmönjohtavuutta. Grafiitin ja teflonin lisäys ovat oleellisia kulutukselle alttiissa kohteissa kitkan alentamisessa. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 205–206.)

4.1.2 Polyasetali (POM)

Polyasetali (POM) on yleisesti käytetty tekninen muovi. Asetaalit ovat vahvoja ja jäykkiä ja niillä on erinomainen väsymisen kesto ja mittapysyvyys. Asetaaleilla on lisäksi matala kitkakerroin, ne ovat helposti prosessoitavia, sietävät hyvin liuottimia ja kestävät ilman kuormitusta noin 90 °C lämpötiloja. (Smith, 1996, s. 380–381.)

Asetaaleja käytetään hammaspyörissä, laakereissa ja johteissa niiden erinomaisen pitkäaikaisen kuormankantokyvyn ja mittastabiiliuden takia. Asetaaleilla on lisäksi hyvä kulumisen kesto ja matala veden absorptio. (Smith, 1996, s. 380–381.)

4.1.3 Termoplastinen polyimidi (PI)

Termoplastinen polyimidi on korkean sulamispisteen, korkean käyttölämpötilan ja hyvän mittapysyvyyden omaava muovi. Polyimidia käytetään hammaspyörissä ja laakereissa. Polyimidin kitkakerroin on pieni joten sitä käytetään myös pinnoitteena liukupinnoilla. Fluoropolymeerin tai molybdeenidisulfidin lisäys polyimidiin tekee siitä itsevoitelevan. (Strong, 2000, s. 254.)

4.1.4 Polyeetterisulfoni (PES)

Polyeetterisulfoni on useita aromaattisia renkaita sisältävä kestomuovi. PES:lla on korkea lujuus, jäykkyys ja lämpötilan kesto. PES:n mittapysyvyys on hyvä ja viruminen on erittäin pientä suurella lämpötila-alueella. (Strong, 2000, s. 253.)

PES:a käytetään kuumavesiputkissa, akkukoteloissa, sulakkeissa. Korkean lämpötilankeston ansiosta PES:a voidaan käyttää myös autoteollisuudessa moottorin lähellä olevissa komponenteissa sekä tiskikoneen osissa. (Strong, 2000, s. 253.)

4.1.5 High Performance -polymeerien materiaaliominaisuuksien vertailu

Edellisissä kappaleissa esiteltyjen High Performance -polymeerien materiaaliominaisuuksia on esitetty taulukossa 3. Taulukon lukuarvot on kerätty MatWeb materiaalitietokannasta ko. polymeerin yleiskatsauksen alta ja taulukossa on esitetty tietokannassa esitetty keskiarvo. (MatWeb.)

Taulukko 3. High Performance -polymeerien materiaaliominaisuuksia (MatWeb).

	PEEK ¹	PES ²	PI ³	POM ⁴
Tiheys (kg/m ³)	1330	1490	1360	1420
Lasimuutoslämpötila (°C)	144	221	308	-54,0
Sulamislämpötila (°C)	343	–	388	166
Muodonpysyvyysslämpötila 1,8 MPa (°C)	176	208	265	103
Prosessointilämpötila (°C)	331	316	397	199
Korkein käyttölämpötila ilmassa (°C)	270	197	282	108
Matalin käyttölämpötila ilmassa (°C)	-52,9	–	–	-40,0
Hajoamislämpötila (°C)	–	400	611	240
Kovuus, Rockwell (M)	100	98,0	99,5	81,0
Vetolujuus (MPa)	102	111	105	53,7
Myötölujuus (MPa)	102	107	108	57,4
Kimmokerroin (GPa)	4,54	7.66	5,78	2,83

Taulukosta 3 voidaan niputtaa esiteltyjen HP-polymeerien ominaisuuksia. Läpikäytyjen polymeerien keskimääräinen tiheys on noin 1400 k g/m³, muodonpysyvyysslämpötila keskimäärin 188 °C ja korkein käyttölämpötila noin 214 °C, kun polyasetaiin selkeästi matalampi myötölujuus jätetään huomiotta myötölujuudeksi tulee noin 100 MPa.

4.2 Polymeerien mekaaniset ominaisuudet

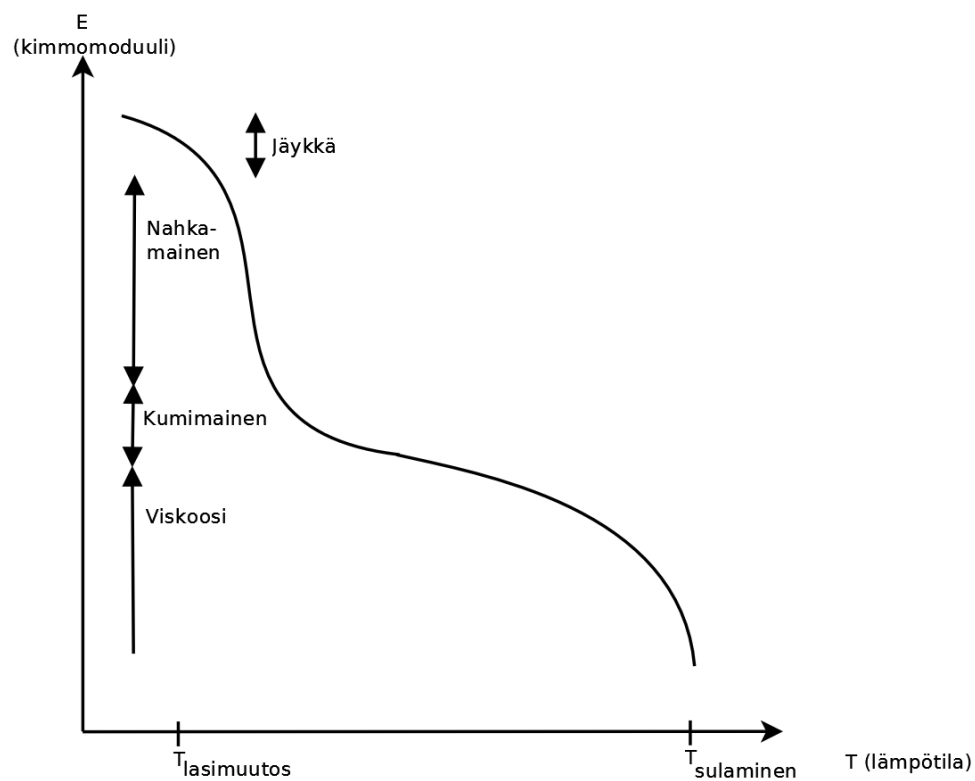
Valittaessa polymeeriä koneenrakennukseen tulisi tuntea polymeerin mekaanisia ominaisuuksia. Polymeerin valinnassa tärkeimmät ominaisuudet, jotka tulee tuntea ovat:

- lasimuutoslämpötila
- jännitys-venymäkäyrän muoto
- visko-elastinen käyttäytyminen
- virumisljuuus ja muodonpysyvyysslämpötila
- iskutkeys ja harsoutuminen
- väsymisljuuus

- vanheneminen
- jännityssäröily

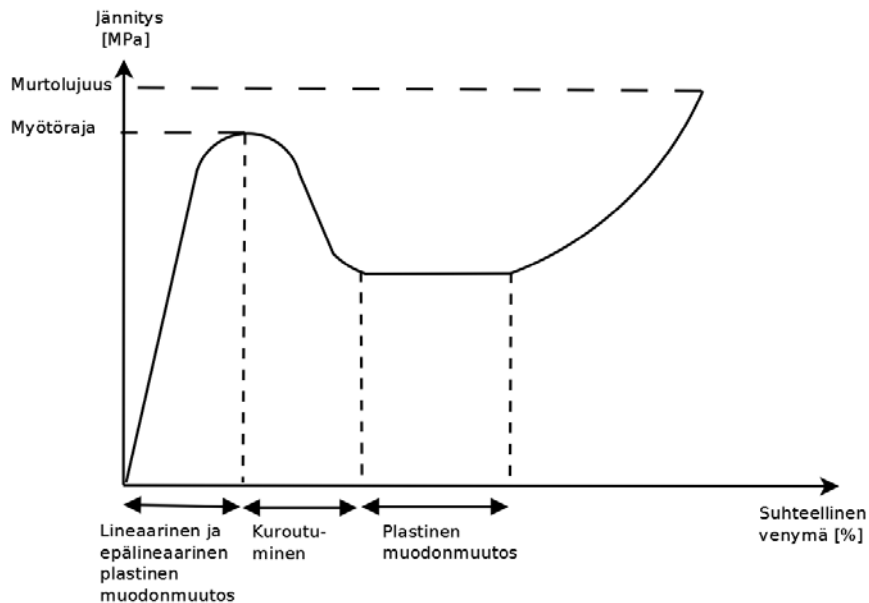
(Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 200.)

Lasimuutoslämpötila on polymeerien termisistä ominaisuuksista tärkein. Lasimuutoslämpötila kuvaa polymeerin kimmomoduulin muutosta lämpötilan funktiona. Mekaanisesti käyttäytyminen hyvin samanlaista kuin lasilla. Kuvassa 9 on esitetty periaatteellinen polymeerin kimmomoduuli lämpötilan funktiona. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 200.)



Kuva 9. Polymeerin kimmomoduuli lämpötilan funktiona (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 200).

Polymeereillä tyypillistä jännitys-venymäkäyrää tarkastellessa, huomataan polymeereillä huomattavan suuri myötääminen ja pitkä venymä ilman muokkauslujittumista. Kuvassa 10 on esitetty polymeerin periaatteellinen jännitys-venymäkäyrä. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 201.)



Kuva 10. Polymeerin jännitys-venymäkäyrä (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 201).

Polymeerin visko-elastiseen käyttäytymiseen vaikuttavat, sekä lämpötila, että kuormituksen nopeus. Alhaisessa lämpötilassa ja/tai nopeasti kuormitettuna polymeeriketjut eivät pääse liikkumaan toistensa suhteen ja polymeerin käyttäytyminen on ensin elastista ja sitten plastista, metallisen materiaalin tapaan. Lämpötilan kasvaessa ja kuormitusnopeuden laskiessa polymeeriketjut pääsevät liikkumaan toistensa suhteen ja polymeerin käyttäytyminen vastaa jähmeän nesteen käyttäytymistä. Iskumaisesti kuormitettuna polymeeriin kohdistuu nopea muodonmuutos ja polymeeriketjut eivät ehdi liikkumaan, tällöin polymeeri käyttäytyy hauraasti ja saattaa jopa rikkoutua helposti. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 201–202.)

Polymeereillä tapahtuu ajan kuluessa muodonmuutosta, eli virumista. Riittävän pitkän ajan kuluttua tapahtuu virumismurtuma. Polymeereille ilmoitetaan virumismurtumaan tarvittava aika eri lämpötiloissa eri jännityksen arvoilla. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 202.)

Muodonpysyvyyttä lämpötila ei ole polymeerin korkein sallittu käyttölämpötila. Monille polymeereille on taulukkoarvona annettu kokemuksen perusteella saatu korkein käyttölämpötila. Muodonpysyvyyttä lämpötila kuvaa mekaanisten ominaisuuksien muuttumista lämpötilan muuttuessa. Muodonpysyvyyttä lämpötilan avulla voidaan muoveja vertailla keskenään. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 203.)

4.3 Polymeerihammaspyörän mitoitus

Polymeerihammaspyörien mitoitusta ei ole esitetty standardissa SFS 4790. SDP-SI:n mitoitusohjeessa on esitetty Nylon MC901 ja Duracon M90 -polymeereistä valmistettujen hammaspyörien mitoitusta (SDP-SI, 2015). Polymeerihammaspyörien mitoituksessa on teräshammaspyörien tapaan laskettava hampaan suurin sallittu taivutusjännitys, sekä hampaan pinnan suurin sallittu Hertzin pintapaine. SDP-SI:n sivuilla esitetyt kaavat näiden laskentaan ovat seuraavat.

Suurin sallittu taivutusjännitys:

$$\sigma_b = \sigma'_b \frac{K_V K_T K_L K_M}{C_S} \quad (6)$$

, jossa σ'_b on suurin sallittu taivutusjännitys ideaaliolosuhteissa, K_V on nopeuskerroin, K_T lämpötilakerroin, K_L voiteluainekerroin, K_M materiaalikerroin ja C_S on käyttöaikakerroin. Kertoimet valitaan taulukosta tai katsotaan kuvaajasta.

Suurin sallittu Hertzin pintapaine:

$$S_C = \sqrt{\frac{F}{bd_1} \frac{i+1}{i}} \sqrt{\frac{1,4}{\left(\frac{1}{E} + \frac{1}{E}\right) \sin 2\alpha}} \quad (7)$$

, jossa F on tangentialinen voima kosketuspisteessä, b on hampaan leveys, d_1 jakohalkaisija, i jakosuhte, E kimmokerroin ja α ryntökulma. Kaava soveltuu suorahampaisen lieriöhammaspyörän laskentaan Duracon M90 -polymeerille. Duraconin kimmokerroin on lämpötilan funktio ja suurin sallittu pintapaine puolestaan kuormanvaihtojen funktio. Kaavalla laskettua pintapainetta verrataan kuormanvaihtojen perusteella kuvaajasta saatavaan pintapaineeseen ja lasketun arvon ollessa tätä pienempi on laskenta varmallalla puolella. (SDP-SI,2015.)

Duracon M90 ja Nylon MC901:lle edellä esitetyt laskentakaavat ja teräksisille hammaspyörille standardissa esitetyt kaavat ovat lähes identtiset. Suurimpana erona laskennassa ovat taulukot ja kuvaajat, joista kertoimet valitaan.

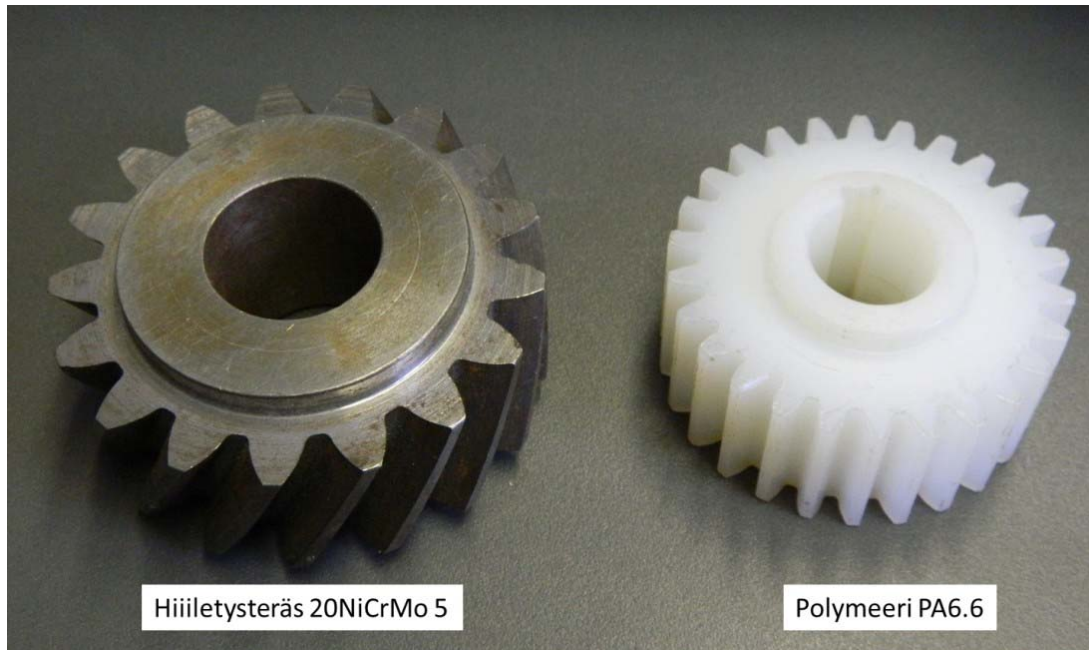
5 TULOKSET

Kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena on vastata tutkimusongelmassa asetettuihin kysymyksiin. Tutkimuksen perusteella teräs- ja polymeerilieriöhammaspyörien mitoituseroa toisistaan suurimmalta osin materiaaliominaisuuksien takia. Erilaisina materiaaleina teräs ja polymeeri asettavat erilaisia vaatimuksia mitoitukseen, suurinapana erona on polymeerien materiaaliominaisuuksien voimakas lämpötilariippuvuus.

Teräksisten hammaspyörien lujuuslaskenta perustuu hampaan pintapaineeseen, sekä tyven lujuuteen. Näihin vaikuttavat materiaaliominaisuudet ovat pintakovuus ja kimmokerroin. Polymeeristen hammaspyörien laskennassa tulee pintapaine ja hampaan tyven leikkaus myös laskea ja vastaavat materiaaliominaisuudet vaikuttavat myös näihin. Polymeereillä materiaaliominaisuudet ovat voimakkaasti lämpötilariippuvaisia. Esimerkiksi kappaleessa 4.3 esitettyjen kaavojen kertoimet ovat voimakkaasti lämpötilariippuvaisia. Edellä mainituista seikoista johtuen polymeerihammaspyörän laskennassa käytettävien arvojen voidaan todeta olevan riippuvaisia lämpötilasta. Polymeerihammaspyörien käyttökohteiden lämpötila tulee tietää ja olla hallittavissa.

Polymeerien materiaaliominaisuuksista johtuen myös kuormituksen luonteeseen tulee kiinnittää huomiota. Polymeerien kuormitusnopeuden ollessa riittävän suuri polymeeriketjut eivät ehdi liikkumaan toistensa ohi ja materiaali käyttäytyy hauraasti. Lisäksi polymeerihammaspyörillä tulisi välttää staattisia kuormia. Staattisen kuorman alaisena polymeereissä tapahtuu virumista. Riittävän pitkään ajan kuluttua tapahtuu virumismurtuma.

Korvattaessa teräspyöriä polymeerisillä olisi syytä myös muistaa, että ei ole pakko rajoittaa teräspyörien profiileihin. Polymeereistä voidaan valmistaa erikoisempiakin hammasprofiileja melko edullisesti valamalla. Kuvassa 11 on esitetty hiiletysteräksinen ja polymeerinen hammaspyörä. Hammasprofiilin optimoinnilla voidaan polymeeripyörissä saavuttaa huomattavaa parannusta suorituskyvyssä (Kleiss, 2015).



Kuva 11. Hiiletysteräs- ja polymeerihammaspyörä (Eskelinen, 2015).

Tutkimusesimerkkejä polymeerihammaspyörien maksimi momentinsiirtokyvyistä ja pyörimisnopeuksista löytyi Maon (2005) tutkimusartikkelista A new approach for polymer composite gear design. Artikkelissa on esitetty tutkimuksen perusteella johdettuja lähestymistapoja nylon ja asetaalihammaspyörien laskennalle. High performance -polymeerien laskennassa tarvittavien ominaisuuksien etsiminen osoittautui sen verran työlääksi, että tässä työssä en kokenut mielekkääksi käydä laskemaan konkreettisia esimerkkejä vastaavien teräs- ja polymeerihammaspyörien tehonsiirrolle. Pelkästään kimmokertoimia ja pintakovuuksia vertaamalla voidaan todeta, että polymeerihammaspyörän tehonsiirtokyky on pienempi kuin teräshammaspyörän. Lisäksi Maon tutkimusartikkelin pohjalta voidaan sanoa, että hammaspyörän lämpeneminen määrittää ylärajan pyörimisnopeudelle.

Hitausmassan laskenta on suoraan verrannollinen hammaspyörän massaan (kaava 3). Jos teräs ja polymeerihammaspyörä ovat ulkomitoiltaan samankokoiset, on hitausmassojen ero näin ollen suoraan riippuvainen käytetyn materiaalin tiheydestä. Kun teräksen tiheytenä käytetään 7850 kg/m^3 ja taulukossa 3 esitettyjen polymeerien tiheydet ovat välillä $1330 - 1490 \text{ kg/m}^3$ on polymeerihammaspyörän massa noin 18 % samankokoisen teräshammaspyörän massasta, sama pätee myös hitausmassaan.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Teräksisten hammaspyörien laskentaan löytyy standardi, jota tosin ollaan kumoamassa. Polymeeristen hammaspyörien laskentaan voidaan soveltaa samaa standardia, jos käytetään standardin mukaisia geometrioita. Polymeerien materiaaliikohtaiset kertoimet joudutaan etsimään muualta, koska standardi ei niitä tarjoa. Polymeerihammaspyörien helpomman mitoittamisen takia olisikin kenties syytä harkita polymeerien lisäämistä standardiin, tai erillisen polymeerihammaspyörästandardin laatimista. Tarvetta polymeerihammaspyörien yleisille mitoitusohjeille ainakin luulisi olevan.

Polymeerien kehityksen myötä lujuusominaisuudet ja lämpötilan kesto ovat nousseet ja polymeerisiä hammaspyöriä voisikin näin ollen käyttää korvaamaan teräksisiä hammaspyöriä joissain kohteissa. Polymeerien ollessa huomattavasti teräksiä kevyempiä saataisiin aikaan säästöä painossa ja näin ollen energian kulutuksessa. Lisäksi polymeerihammaspyörien käynti on hiljaisempaa ja niiden vaimennusominaisuudet ovat paremmat kuin terästen.

Teräksisten hammaspyörien suositellut moduulit ja hammasmuodot on rajoitettu käytännön syistä. Jos moduuleja voisi valita mielivaltaisesti, olisi tarvittavien työkalujen lukumäärä valtava. Käytettäessä teräspyörä-polymeeripyörä-paria määrää teräspyörä polymeeripyörän profiilin. Jos korvataan teräspyörät täysin polymeeripyörillä, voidaan pyörän profiili suunnitella käyttökohteen ja käytetyn polymeerin mukaan optimaaliseksi. Erilaiset profiilit eivät ole polymeeripyörien valmistuksessa niin suuri ongelma, kuin teräspyörillä, sillä polymeeri- hammaspyöriä voidaan valmistaa valamalla.

Jos polymeerihammaspyöriä halutaan käyttää yleisemmin teräspyörien rinnalla tai korvaajana polymeerien materiaali-, lujuus-, ja kulumisominaisuuksista tulisi kerätä taulukoitua tietoa, jota olisi helppo vertailla ja käyttää laskennassa. Erilaisista polymeeri-teräs ja polymeeri- polymeeri -parien kulumisesta tarvitaan helposti löydettäviä taulukkoarvoja kestoajan laskemiseen. Lisäksi olisi hyvä kartoittaa saman polymeerin eri laatuojen ominaisuuksia, sekä lisä- ja täyteaineiden vaikutusta polymeerin kestoikään.

LÄHTEET

Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M. & Välimaa, V. 2009. Koneenosien suunnittelu. 4.-5. painos. Helsinki: WSOYpro Oy. 796 s.

Budynas, R. G. & Nisbett, J. K. 2011. Shigley's Mechanical Engineering Design 9th edition. McGraw- Hill. 1088 s.

Davis, J.R. 2005. Gear Materials, Properties, and Manufacture. ASM International (OH). 339 s.

Eskelinen, H. 2015. [ei aihetta] [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: juhamatti.smolander@lut.fi. Lähetetty 20.2.2015 klo 12:39 (GMT +0200). Liitetiedosto: "HPn kuvat 2 kpl.docx".

Eskelinen, H & Karsikas, S. 2013. Vihreän teknologian näkökulmat konstruktio materiaalien valinnassa. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 364 s.

Fluorotech. 2015. PEEK, polyeeteriketoni [verkkosivu] [viitattu: 4.3.2015]. Saatavissa: <http://fluorotech.fi/peek>

Historic American Buildings Survey. julkaisuvuosi tuntematon. 5. LOOKING UP INTO CAP FROM FLOOR 3; CAP RACK, BRAKE WHEEL, BRAKE AND WALLOWER - Pantigo Windmill, James Lane, East Hampton, Suffolk County, NY. [verkkosivu] [viitattu 23.1.2015] Saatavissa: <http://www.loc.gov/pictures/item/ny1273.photos.123483p/>

Inductiveload. 2007. Spur Gear 12mm, 18t.svg [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.2.2015] Saatavissa: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spur_Gear_12mm,_18t.svg

Juvinall, R. C. & Marshek K. M. 1999. Fundamentals of machine component design 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc. 888 s.

Karppinen, A. 2014. Lausuntopyyntö kumottaviksi esitettävistä vanhentuneista SFS-standardeista [verkkodokumentti]. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. [Viitattu 14.2.2015], Saatavissa: http://www.sfs.fi/files/6083/Kumottavat_SFS-standardit.pdf

Kleiss, R. 2015. Take a PEEK at polymer [www-artikkeli]. [Viitattu 7.3.2015]. Saatavissa: <http://www.gearsolutions.com/article/detail/6050/take-a-peek-at-polymer>

Mao, K. 2007. A new approach for polymer composite gear design. Wear 262 (2007). s. 432-441.

MatWeb. [materiaalitietokanta] [viitattu 4.3.2015] saatavissa: <http://www.matweb.com/>

Raaka-ainekäsikirja 1. 2001. Muokatut teräkset. Metalliteollisuuden keskusliitto, MET. Tampere: Metalliteollisuuden keskusliitto, MET. 361 s.

Raysper, Y. 2006. Evolvent of circle [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.2.2015]. Saatavissa: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolvent_of_circle.jpg

SDI-SI. 2015. Design of Plastic Gears and General Considerations of Plastic Gearing. [verkkosivu] [viitattu: 7.3.2015] Saatavissa: <http://www.sdp-si.com/plastic/design-of-plastic-gears.htm>

SFS-EN 10084. 2008. Hiiletysteräkset. Tekniset toimitusehdot. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 64 s.

SFS 3389. 1975. Hammaspyörät. Suorahampaiset lieriöhammaspyörät. Geometrinen arvojen laskenta. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 20 s.

SFS 4790. 1983. Hammaspyörät. Lieriöhammaspyörien lujuuslaskenta. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 52 s.

Smith, W.F. 1996. Principles of materials science and engineering 3rd edition. New York: McGraw-Hill. 892 s.

Sten. 2015. Hiiletysteräkset [verkkosivu]. [Viitattu 21.2.2015]. Saatavissa: http://www.sten.fi/sten_fin/tuotteet/hiiletysterakset/

Strong, A.B. 2000. Plastics: materials and processing 3rd edition. Upper Saddle River(NJ): Pearson Prentice Hall. 917 s.

Valtanan, E. 2012. Tekniikan taulukkokirja. 19. painos. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy. 1200 s.