

Jenni Pihlajamäki

# HYDRAULISET TIIVISTEET

Toiminta korkean lämpötilan sovelluksissa

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Hasse Nylund  
Elokuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Jenni Pihlajamäki: Hydrauliset tiivisteet: Toiminta korkean lämpötilan sovelluksissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Elokuu 2023

---

Suurin osa hydraulisten systeemien ongelmista johtuu tiivisteiden ongelmista tai huonosta asennustyöstä. Hydraulisten tiivisteiden toimintaa on tutkittu pitkään. Tiivisteiden tutkiminen on kuitenkin erittäin haastavaa, minkä takia ei edelleenkään osata tarkkaan ennustaa tiivisteiden kulumiskäyttäytymistä. Tässä työssä on pyritty selvittämään, mitä tällä hetkellä tiedämme hydraulisten tiivistemateriaalien kulumis- ja hajoamiskäyttäytymisestä. Työ on lisäksi katsaus useisiin tiivistämisen ilmiöihin, kuten polymeerien elastisuus, voiteluaineen ominaisuudet ja puristusväli.

Erityisesti on pyritty valikoimaan tutkimuksia, joissa säädellään tai tutkitaan lämpötilan ja paineen vaikutuksia tiivistemateriaalin ominaisuuksiin ja toimintaan, mutta esimerkiksi useissa kitkatutkimuksissa lämpötila on myös keskeisessä roolissa. Tiedetään, että korkea käyttölämpötila kiihdyttää erityisesti tiivistemateriaalin ikääntymistä ja paineen kasvu lisää vaurioitumisen riskiä. Korkea lämpötila ja paine vaikuttavat tiivisteeseen lisäksi myös erityisesti voitelukerroksen käyttäytymiseen, joka edelleen vaikuttaa tiivisteiden kitkakäyttäytymiseen ja kuumenemiseen.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa on läpikäyty useita tieteellisiä artikkeleita, joissa on tutkittu polymeerimateriaalien ominaisuuksia ja käyttäytymistä eri menetelmillä. Tarkoituksena oli löytää materiaalivaihtoehtoja korkean lämpötilan ja paineen sovelluksiin. Yhteenvetona kaikista tutkimuksista ja valmistajien tarjonnasta parhaiksi o-rengasmateriaaleiksi valikoituivat VMQ, FVMQ, FKM, TFE/P ja FFKM sekä liukutiivistemateriaaleiksi PTFE ja PEEK. Tärkeää on valita sovellukseen sopiva tiivistemateriaali ja -malli. Tukirenkaiden ja puskurirenkaiden tarve pitää käydä läpi. Lisäksi on huomattava, että polymeeristen tiivisteiden materiaaliominaisuudet rajoittavat niiden toimintalämpötilat alle 300 asteen ja paineen sietokyvyn alle 80 MPa, joten käyttösovelluksen muita ominaisuuksia voidaan joutua säätämään.

Avainsanat: Hydrauliset tiivisteet, korkea lämpötila, korkea paine, staattiset tiivisteet, dynaamiset tiivisteet, o-renkaat, tukirenkaat, tiivistemateriaalit, polymeerit, elastomeerit, käyttöikätestaus, kitka, tiiviste, kuluminen, rakopuristuminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. HYDRAULITIIVISTÄMINEN .....	2
2.1 Polymeerit tiivistemateriaaleina .....	2
2.2 Tiivistemateriaaleja .....	9
2.3 Tiivisteet ja tiivistemallit .....	16
2.4 Hydraulitiivistämisen perusteet .....	21
3. SOVELLUKSIA .....	28
3.1 Lämpötilan vaikutus .....	28
3.2 Tulevaisuuden näkymiä .....	33
4. YHTEENVETO .....	37
LÄHTEET .....	38

# KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Polymeerien molekyyliarakenteet, ("Luento 2 polymeerien rakenteet.pdf,")</i> .....	4
<i>Kuva 2. Polymeerien jännitys-venymäkäyriä, mukaillen (Polymerdatabase, 2023)</i> .....	5
<i>Kuva 3. Elastomeerien lämpötilakestävyys (Techne, 2014)</i> .....	10
<i>Kuva 4. Polymeerimateriaalit jaoteltuna käyttökohteen mukaan, ("Muovien luokitus," 2023)</i> .....	11
<i>Kuva 5. Kestomuovien hinta ja lämpötilankesto, mukaillen (Curbellplastics, 2023)</i> .....	12
<i>Kuva 6. PTFE-koaksiaaliivisteiden eri muotoja ja tyypilliset paineprofiilit, mukaillen (Muller, 1998)</i> .....	18
<i>Kuva 7. Tiivistemalleja (Heipl ja Murrenhoff, 2015)</i> .....	19
<i>Kuva 8. Jousitetut tiivisteet (Parker katalogi, 2011)</i> .....	20
<i>Kuva 9. Perinteiset viritetyt liukutiivisteet (Parker katalogi, 2011)</i> .....	20
<i>Kuva 10. Erilaisia tukirenkaita (Parker katalogi, 2011)</i> .....	21
<i>Kuva 11. Hydraulisyliinterin tiivisteet, mukaillen (SKF katalogi, 2014, s. 15)</i> .....	22
<i>Kuva 12. Mekaaninen tiiviste, mukaillen ("What is a Mechanical seal?," 2015)</i> .....	23
<i>Kuva 13. Puristusväli eli "e-gap" esitettynä, mukaillen (Sealing Australia, 2014)</i> .....	24
<i>Kuva 14. Tiivisteiden yleisimpiä hajoamismenetelmiä taulukossa, mukaillen ("O-Ring Failure Chart Troubleshooting Guide by Marco Rubber," 2023)</i> .....	27
<i>Kuva 15. TPU pinta ennen (a) ja jälkeen (b) sekä NBR pinta ennen (c) ja jälkeen (d), mukaillen (Pinedo et al., 2018)</i> .....	30

# 1. JOHDANTO

Hydrauliset tiivisteet ovat merkittäviä osia käyttösovelluksissa, mutta ominaisuuksiensa ja käyttöolosuhteidensa vuoksi ne ovat myös vaikeasti tutkittavia (Nikas, 2010; Pinedo et al., 2018). Tilastot sanovat, että yli 80 prosenttia hydraulisylinterien vuodoista liittyy tiivisteiden heikkenemiseen (Zhao et al., 2022). Hydraulitiiviste on pieni koneen osa, jonka toimintahäiriö tai vaurioituminen voi johtaa suuriin rahallisiin ja materiaalsiin menetyksiin. Nikas:n (2010) raportin mukaan edestakaisen liikkeen tiivisteitä on tutkittu 1930-luvulta asti ja ainoastaan viime vuosina on ymmärretty perusteet kaikista niiden suorituskykyyn vaikuttavista ilmiöistä. Tässä kandidaatintyössä käsittelen erityisesti lämpötilan vaikutusta hydraulisten tiivisteiden toimintaan.

Aihe on itselleni tärkeä, koska työskentelin osittain kesätöissä tiivisteiden parissa. Keskustelimme kollegoiden kanssa tiivisteiden tärkeydestä ja tiivistämisen haasteista. Teollisuudessa joudutaan jatkuvasti tekemään tiivisteiden valinnassa kompromisseja ja itseänikin jäi mietityttämään, että paljonko tiivistevaihtoehtoja edes on, mistä valita. Lähteitä hakiessa minulle paljastui nopeasti, kuinka fyysikaalisesti monimutkainen asia tiivistäminen on ja erityisesti se, kuinka huonosti osaamme yhdistää kaikki tiivistämisen ilmiöt toisiinsa.

Tämän kirjallisuuskatsauksena tavoitteena on selvittää, mitä tiivistevaihtoehtoja on erityisesti korkean lämpötilan sovelluksille, ja mitä niistä tiedetään. Tutkimuskysymys siis on; mikä materiaali kestää korkeaa lämpötilaa eri sovelluksissa? Hydraulisia tiivisteitä on monenlaisia, mutta ne ovat aina polymeerisiä. Tämän vuoksi luvussa kaksi käydään ensin läpi polymeerien ominaisuuksia sekä yleisimpiä tiivistemateriaaleja ja -malleja. Luvun kaksi lopussa käydään läpi tiivistämisen perusteita. Kolmannessa luvussa voidaan pohjatiedon varassa laajentaa käsittely keskittymään erityisesti siihen, miten lämpötila vaikuttaa tiivisteiden ominaisuuksiin ja toimintaan tulevaisuuden kehitysnäkymiä unohtamatta.

## 2. HYDRAULITIIVISTÄMINEN

Tässä luvussa käsittelen ensin tarkemmin tiivistemateriaalin ja -mallin vaikutus tiivisteeseen kulumiseen ja elinikään. Lisäksi käyn läpi, mitä tiivistettä valittaessa ja tiivistettäessä tulee huomioida. Tulee aina muistaa, että soveltuvaa hydraulittivistettä valittaessa tärkeintä on kuitenkin sovelluksen kokonaisolosuhteiden tunteminen esimerkiksi pinnankarheuksista käytettyyn väliaineeseen ja oikea tiiviste valitaan näiden tapauskohtaisten tietojen perusteella.

### 2.1 Polymeerit tiivistemateriaaleina

Tiivisteet valmistetaan useimmin erilaisista polymeereistä, joilla on elastisia ominaisuuksia (Muller, 1998). Polymeerien käyttäytymiseen vaikuttaa merkittävästi muun muassa lämpötila, paine, kosteus, kemikaalit, hapettuminen ja vanheneminen (Nikas, 2008). Nikas:n mukaan polymeerien mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi lämpötilan mukaan, ja niiden lämpölaajenemiskerroin on usein suuri. Tällaisia polymeerejä ovat muun muassa polyuretaani (PU/PUR), nitrilikumi (NBR), etyleenipropyleenidieenikumi (EPDM) ja fluorokumi (FKM). Vaihtoehtoja on monia ja myös komposiittimateriaaleja käytetään vaativimmissa olosuhteissa. Lisäksi termoplastista polytetrafluorieteeniä (PTFE) käytetään paljon liukurenkaissa.

Tiivistemateriaaleille keskeisiä ominaisuuksia on suuri sitkeys (suuri venyvyys ja lujuus) ja pieni jäykkyys (pieni kimmokerroin) sekä suhteellisen korkea viskoelastisuus tai viskoplastisuus. Lisäksi monissa sovelluksissa tärkeää on materiaalin hyvä kemikaalien, paineen ja lämpötilan sietokyky. Nämä ominaisuudet mahdollistavat tehokkaan tiivistämisen.

### Polymeerien ominaisuuksia

Teollisuudessa polymeereistä käytetään myös nimitystä ”muovit” (Muoviteollisuus ry, 2023). Muovi on yhden tai useamman polymeerin seos, johon saate-

taan lisätä sen ominaisuuksia parantavia lisäaineita. Muovit voidaan luokitella sen perusteella ovatko ne palautuvia tai palautumattomia. Polymeerit jaotellaan palautumisominaisuuksien eli molekyylitason ominaisuuksien perusteella elastomeereihin eli kumimaisiin materiaaleihin, kestumuoveihin eli termoplastisiin polymeereihin ja kertamuoveihin eli lämpökovettuviin polymeereihin.

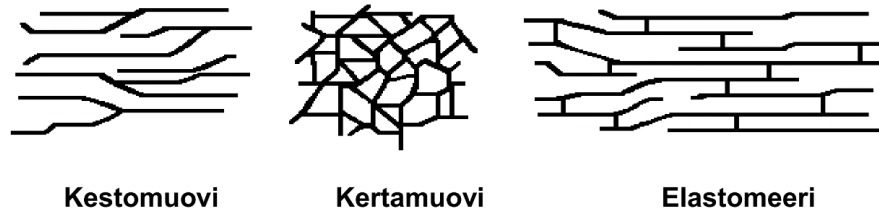
Elastomeerit ovat kumimaisia materiaaleja. Yleinen määritelmä on sanoa polymeeriä elastomeeriksi, jos materiaali on huoneenlämmössä kumimainen. Käsitteitä elastomeeri ja kumi käytetään tiivistystekniikassa usein tarkoittamaan samaa (Muller, 1998). Kestumuovia eli termoplastista polymeeriä voidaan muovata uudestaan lämmittämisen jälkeen. Kestumuovit jaetaan edelleen amorfisiin ja osakiteisiin kestumuoveihin. Kertumuovia voi muovata vain kerran.

Lisäksi joskus puhutaan termoplastisista elastomeereistä eli termoplastisista muoveista. Näillä ”termoelasteilla” viitataan kestumuoveihin, jotka ovat normaalia pehmeämpiä ja sitkeämpiä matalalla taivutusmoduulilla (”Osa 11 – termoplastiset elastomeerit – Muoviyhdistys ry – muovitietoa ja kontakteja,” 2016, s. 11). Nimestä voi päätellä, että ne ovat elastomeerien tavoin käyttäytyviä kestumuoveja.

Muovit muodostuvat polymeereistä, jotka muodostavat polymeeriketjuja. Kestumuovi muodostuu polymeeriketjuista, jotka sitoutuvat toisiinsa heikoilla sidoksilla (”Materiaalien kemia,” 2017). Normaalilämpötilassa nämä ketjut ovat lämpöliikkeessä toistensa suhteen, mikä mahdollistaa venyvyyden (Chandrasekaran, 2010). Sidosten vähyys ketjujen väleille mahdollista liikehdinnän ja vapaan tilan materiaalissa (kuva 1). Kertamuovit vastoin ovat muodostuneet niin sanotusti polymeeriverkoista. Kertamuovin molekyyliden väliset silloitussidokset mahdollistavat tiukemman molekyylirakenteen (Muoviteollisuus ry, 2023). Uudelleen muovattaessa tämä kemiallinen rakenne hajoaa. Kertamuovit ovat lujimpia ja kestävät kuumentamista parhaiten.

Elastomeerien rakenne koostuu ketjujen verkosta sekä ristisidoksista, jotka ovat väljästi asettuneet. Niiden elastisuus perustuu näiden ketjujen huomattavaan lämpöliikkeeseen, joka ei olisi mahdollista, jos ketjut olisivat tiiviisti pakattuja. Polymeeriketjut ovat siis erittäin venyviä ja toisaalta palautuvat alkuperäiseen muotoonsa. Kumissa oleva vapaa tila johtaa myös siihen, että kumin sisään voi

päästä materiaalia, kuten nesteitä ja kaasuja, jotka voivat johtaa paisumiseen tai turpoamiseen. Esimerkiksi öljyn kyky turvottaa luonnonkumia on hyvin tunnettu (Chandrasekaran, 2010).



**Kuva 1.** Polymeerien molekyylirakenteet, ("Luento 2 polymeerien rakenteet.pdf,")

Yhteistä kaikille tiivistemateriaaleille on suuri sitkeys ja pieni jäykkyys. Sitkeys tarkoittaa materiaalin kykyä ottaa vastaan energiaa murtumatta. Jäykkyys taas kuvaa materiaaliin kohdistetun jännityksen suhdetta sen aiheuttamaan pituuden muutokseen. Jäykkyyttä kuvataan kimmokerroimella, jossa suurempi kimmokerroimen arvo viittaa jäykempään materiaaliin. Esimerkiksi PTFE:n kimmokerroimen arvo on 0.4 ja betonin 10-40. Jäykkyyden arvot polymeereillä voivat vaihdella paljon, minkä vuoksi esimerkiksi PEI:llä on kimmokerroin 3 GPa ja hiilikuituvahvistetulla PEEK:llä 13-22 GPa (Omnexus, 2023).

Jokin hydraulitiivisteiden osa on kuitenkin aina joustava, jos ei päätiiviste niin sitä tukeva tiiviste (Nikas, 2010). Tämän vuoksi hydraulitiivisteissä on usein useampi osa. Joustavuus tiivistesysteemeissä on tarpeellista, jotta tiivisteiden pinnalle syntyvät kosketuspaineet säätyvät automaattisesti käyttösovelluksen tuomien paineiden mukana. Tämän takia juuri elastomeerit tai elastiset materiaalit sopivat tiivisteiksi (Muller, 1998). Nämä materiaalit kestävät monesta suunnasta tulevia voimia ilman pysyviä muodonmuutoksia, mikä on hyödyllinen ominaisuus nopeisiin painevaihteluihin mukautumiseksi (Nikas, 2010). Tässä haasteena on hystereesi eli palautumishitaus, kun elastomeereja altistetaan muuttuville paineolosuhteille.

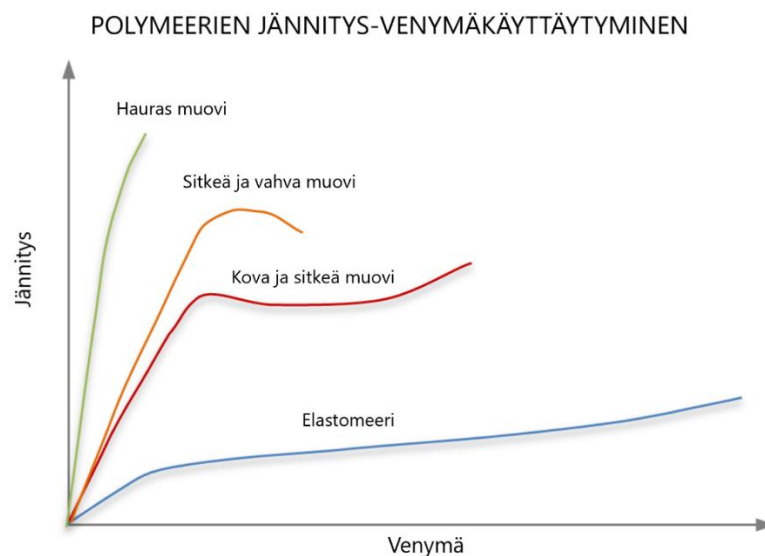
## Epälineaarinen jännitys-venymäkäyrä

Polymeeri- ja komposiittimateriaaleilla on epälineaarinen jännitys-venymäkäyrä (Nikas, 2008). Epälineaarisuus tarkoittaa sitä, että syy-seuraussuhde ei ole li-



neaarinen vaan sisältää ennakoimattomia epäjatkuvuuskohtia. Epälineaarisuuteen vaikuttaa muun muassa rasitusnopeus ja lämpötila (Polymerdatabase, 2023). Tämän lisäksi materiaalin viskoelastisuus (erityisesti elastomeerit), viskoplastisuus (erityisesti kestumuovit) ja yleensä äärellinen elastisuus, jonka arvioimiseksi on kokeellisesti johdettu kertoimia, jotka nekin ovat epätarkkoja ja hyvin olosuhderiippuvaisia (Nikas, 2010). Esimerkiksi elastomeerien vaste jännitykseen ja venytykseen muuttuu merkittävästi lämpötiloissa, jotka ovat lähellä lasittumislämpötilaa (noin 0:sta -70 °C:n), jolloin materiaali muuttuu kovasta ja hauraasta kumimaiseksi tai nahkamaiseksi (Nikas, 2008). Kestumuoveilla lasittumislämpötila voi olla hyvin korkea ja lähellä sulamispistettä (100-300 celsius-ta).

Alla olevassa kuvassa (kuva 2) nähdään vasemmalla ”hauras muovi” ja oikealla ”elastomeeri”. Murtuma syntyy jännitysmaksimin kohdalla ilman suurta venymää hauraalle polymeerille, mutta elastomeeri jatkaa venymistään. Jännitys-venymäkäyrällä voidaan kuvata myös lämpötilan vaikutusta polymeerin ominaisuuksiin. Lämpötilan ollessa alhaalla, ja alle materiaalin lasittumislämpötilan, materiaali käyttäytyy enemmän kuin ”hauras muovi”. Lämpötilan noustessa muovi muuttuu hauraasta sitkeämmäksi (kuvaajassa oikealle päin), jolloin se venyy merkittävästi enemmän, elastisesti ja plastisesti, ennen murtumaa. Näitä ominaisuuksia haetaan tiivisteisiin. Yleisesti esimerkiksi materiaalin elastisuus halutaan minimoida, mutta tiivistäessä se on erityisen tärkeässä asemassa.



**Kuva 2.** Polymeerien jännitys-venymäkäyriä, mukailten (Polymerdatabase, 2023)

Elastisuus eli kimmoisuus tai joustavuus on materiaalin ominaisuus, joka kuvaa sitä, miten hyvin kappale palaa alkuperäiseen muotoonsa venytyksen jälkeen. Tämä ns. venytysvastus määrittää kimmomoduulin, jonka arvo elastomeerien tapauksessa pienenee lämpötilan kasvaessa (Muller, 1998). Kuten yläpuolen kuvasta oli havaittavissa. Alun suorin kulmakerroin eli kimmomoduuli pienenee. Tämä tarkoittaa, että muuten pienen jäykkyyden omaavan materiaalin jäykkyys pienenee entisestään.

Poikkeus edelliseen on Joule-Gough-ilmiö, jossa kimmomoduuli kasvaa lämpötilan kasvaessa (Muller, 2019, s.20). Polymeeri voi siis muuttua korkeammassa lämpötiloissa myös hauraammaksi, mutta vain jos sitä rasitetaan. Ilmiön mukaan, jos elastomeeria venytetään ja sitten lämmitetään, niin se myös kutistuu ja lujittuu. Tämä johtuu polymeeriketjujen uudelleenasetumisesta tiiviimmin. Vaikutus on tärkeä O-rengastiivisteiden suunnittelussa, jossa tiivisteet voidaan asentaa kokoonpuristuneina kuumissa sovelluksissa käyttöiän pidentämiseksi ("Gough–Joule effect," 2020).

Elastomeerien viskoelastinen käyttäytyminen taas tarkoittaa, että voidaan havaita sekä kiinteiden kappaleiden elastinen käyttäytyminen (palautuva) että nesteiden viskoosinen käyttäytyminen (palautumaton tai liikettä vastustava). Rasituksen tyypistä riippuen jompikumpi ominaisuus on voimakkaampi (Rinnbauer, 2014). Viskoplastisuus taas viittaa materiaalin nopeudesta riippuvaan plastiseen muodonmuutokseen. Tämä tarkoittaa sitä, että materiaalin muodonmuutokseen (plastisuuteen) vaikuttaa kuormituksen eli rasituksen lisäämisnopeus.

## **Muita mekaanisia ilmiöitä**

Puristuspainuma on ominaisuus, jolla kuvataan sitä paljonko materiaali muuttaa muotoaan tai korkeuttaan, kun siihen kohdistetaan puristavaa voimaa tietyn ajan. Esimerkiksi kumien puristuspainuma-arvo on alhainen, mikä tarkoittaa, että ne palautuvat alkuperäiseen muotoonsa helposti ("Osa 11 – termoplastiset elastomeerit – Muoviyhdistys ry – muovitietoa ja kontakteja," 2016). Ajan kanssa puristuspainumaominaisuudet huononevat ja materiaali voi muuttaa muotoaan plastisesti ("Compression Set of Elastomeric Materials," 2023). Huonon pu-

ristuspainuman omaava materiaali voi soveltua paremmin staattiseksi tiivisteeksi.

Stick-slip ilmiöllä tarkoitetaan kahden pinnan välillä havaittavaa nykivää liikettä. Nykivyys ja takertelevuus johtuu pinnan vaihtelevista kitkaominaisuuksista. Tätä aiheuttaa pintojen epätasaisuus ja lämpeneminen. Ilmiö on yleinen polymeereillä, joilla pintapaineet ovat suuria ja muovin lämmönjohto on huonompi (Muller, 1998). Ongelma pyritään usein ratkaisemaan paremmilla materiaaleilla tai voiteluaineilla.

Turpoamisesta puhutaan silloin, kun tiivistemateriaali on kosketuksissa nesteseen ja neste absorboituu polymeeriin. Syynä on kumissa luonnostaan oleva vapaa tila (Chandrasekaran, 2010). Neste materiaalin mikrorakenteessa heikentää materiaalisidoksia rikkomalla polymeeriketjuja (Mahankar and Dhoble, 2021). Mahankar ja Dhoble havaitsivat murtolujuuden laskevan 25-60 prosenttia matalammaksi ja murtovenymän 74-42 prosenttiin alkuperäisistä arvoista. Turpoaminen aiheutti FKM:n ja EPDM:n tapauksessa halkeamia ja kuoppia materiaalissa, kun turvottava aine oli biopolttoaine, diesel tai öljy. Lisäksi materiaalit pehmenivät ja niiden kimmoisuus heikkeni, mikä edistää sovelluksissa nähtävää kulumaa. Korkeampi voiteluaineen viskositeetti lisää nesteen diffuusiota tiivistemateriaaliin ja pahentaa turpoamista. Tiivisteiden ikään vaikuttaa paljon ristisiloitustiheys ja sen seurauksena mahdollistuva turpoamistilavuus.

Elastomeerit sopivat hydraulitiivisteiksi, koska ne ovat todella joustavaa materiaalia. Niiden kimmo- ja liukumoduulit ovat suhteellisen alhaiset, mikä tarkoittaa, että ne kestävät suuria jännityksiä ilman pysyviä muodonmuutoksia (Nikas, 2008, 2010). Elastomeerit vanhenevat hapettumisen vuoksi, vaikka niitä ei käytettäisikään. Ne voivat paisua hydraulinesteen imeytymisestä, reagoida kemiallisesti yhteensopimattomien hydraulinesteiden kanssa ja kulua nopeasti, kun niitä hierotaan suhteellisen karheisiin, koviin pintoihin. Samanlaisia ongelmia esiintyy termoplastisissa tai komposiittitiivisteissä, kuten PTFE:stä valmistetuissa tiivisteissä (Nikas, 2008).

Elastomeeriset tiivisteet ovat lisäksi lähes kokoonpuristumattomia, hyperelastisia kiinteitä aineita, jotka reagoivat epälineaaraisesti jännitykseen tai venytykseen, ja joiden reaktiot eroavat huomattavasti lähellä lasittumislämpötilaa. Ko-

koonpuristumattomuus tarkoittaa, että materiaalin koko ei muutu ja materiaalia voidaan vain siirtää. Elastomeerien lisäksi kaikki polymeerit ovat lähes kokoonpuristumattomia (Nikas, 2010). Käytännössä tämä tarkoittaa, että tiivisteisiin kohdistuva hydraulinen paine siirtyy lähes kokonaan tiivisteestä tiivistepintaan.

Systeemin suuret paineet aiheuttavat elastohydrodynaamiseen voitelukerrokseen elastisia muodonmuutoksia ja viskositeetin kasvua, mikä mahdollistaa kalvon pysymisen ehjänä ja voiteluaineen paremman pysymisen voideltavien osien välillä (Holopainen, 2018). Voitelukalvon paksuus on vaivaiset noin 0,1-2  $\mu\text{m}$ , joten se on erittäin herkkä öljyn epäpuhtauksille.

Tiivisterenkaan kuluminen liittyy muun muassa kosketuspaineeseen, liukunopeuteen, materiaalin ominaisuuksiin ja kosketuspaineeseen (Gong et al., 2019). Korkea lämpötila vaikuttaa kiihdyttävästi elastomeerien hajoamiseen (Bae and Chung, 2017). Lisäksi esimerkiksi tiivisteiden varastosäilyttämiselle on rajoja. Esimerkiksi FKM:n tyypillinen säilytysaika on 10 vuotta ja maksimissaan 14 vuotta (SKF katalogi, 2014). PTFE taas säilyy 15 vuotta.

## **Lämpötilan vaikutus**

Lämpötila vaikuttaa merkittävästi tiivisteiden ominaisuuksiin. Yksi merkittävimmistä polymeerien ominaisuuksista on lasisiirtymä. Lämpötilaominaisuudet johtuvat osin myös polymeerien amorfisesta eli järjestäytymättömästä polymeeriketjura-kenteesta ("Osa 11 – termoplastiset elastomeerit – Muoviyhdistys ry – muovitie-toa ja kontakteja," 2016). Lisäksi esimerkiksi edellä mainittu Joule-Gough-ilmiö merkitsi sitä, että elastomeerin jäykkyys kasvaa lämpötilan kasvaessa, jos materiaali on rasituksen alaisena. Ilmiö on havaittavissa vain elastomeereilla.

Lasittumislämpötila ( $T_g$ ) on polymeerikohtainen lämpötila, joka riippuu polymeeri-seoksesta ja ympäristön lämpötilasta. Luonnonkumin lasittumislämpötila on -70 celsiusta (Chandrasekaran, 2010), minkä alapuolella materiaali on haurasta ja käyttäytyy kuin lasi. Lasisiirtymälämpötilan ylittyttyä materiaali muuttuu elastisemmaksi, mikä tarkoittaa molekyylien lämpöliikkeen lisääntymistä. Joillakin fluoroelastomeereilla lasittumislämpötila on lähempänä normaalia huoneenlämpötilaa, mikä voi aiheuttaa ongelmia (Chandrasekaran, 2010). Lisäksi lasittumis-

lämpötilan jälkeen materiaalin lujuus laskee ja lämpölaajeneminen nousee dramaattisesti (Drakeplastics, 2021)

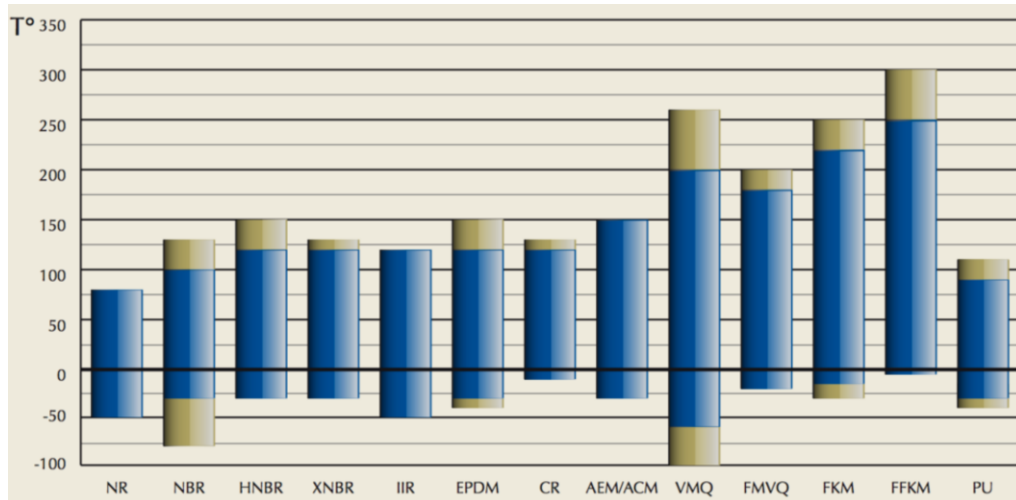
Toinen polymeereille merkittävä lämpötila on niin kutsuttu taipumislämpötila eli HDT lämpötila (Heat distortion temperature). Arvo, kertoo sen, missä lämpötilassa kiinteälle kuormitukselle alistettu materiaali alkaa pehmetä. Standardissa ASTM D 648 taipumislämpötila on määritelty lämpötilaksi, jossa vakiotikku (127x13x12 mm) on taipunut 0.25 mm vakio- tai taivutuskuormituksessa 455 kPa tai 1.82 MPa.

Sovelluskohteen ollessa staattinen tai dynaaminen on huomioitava tiettyjä materiaalin mekaanisia ja termisiä ominaisuuksia. Alhaisen repimislujuuden ja korkean kitkakertoimen materiaali on erittäin sopiva staattisessa tiivistesovelluksessa toisin kuin dynaamisessa. Lisäksi dynaamisen sovelluksen lämpötilat ovat usein korkeampia, mikä vaatii materiaalilta enemmän lämpötilan kestoa.

Materiaalin ominaisuuksia voidaan myös jossain määrin tukea lisäaineilla. On kuitenkin huomattava, että tämä ei muuta perusaineen antamia rajoja (Drakeplastics, 2021). Fluoratuilla lisäaineilla voidaan esimerkiksi parantaa materiaalin lämmön, kemikaalien sekä korroosionkestävyyttä (Muller, 1998). Yleisesti käytetään esimerkiksi hiilimustaa vahvistamaan elastomeerien sidoksia (Muller, 2019, s.31).

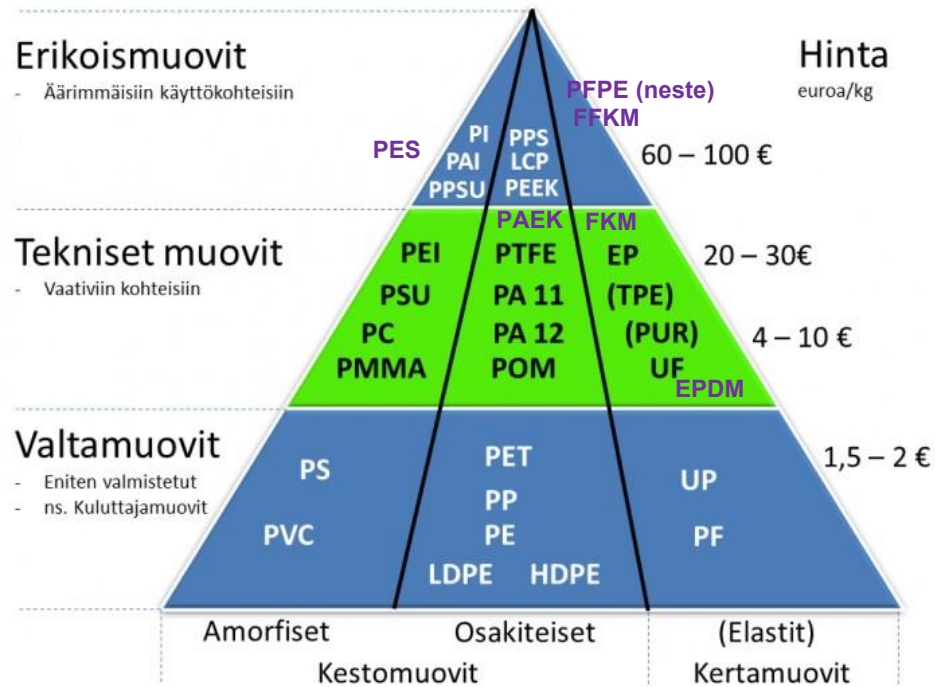
## 2.2 Tiivistemateriaaleja

Yleisimmin käytettyjä tiivistemateriaaleja ovat elastomeerit, kumia muistuttavat materiaaliyhdistelmät, muovit, polyuretaani ja komposiitit (Nikas, 2010). Kumi-  
nen tiiviste voi olla esimerkiksi vulkanoitu eli lämpökäsitelty luonnonkumi tai synteettinen kumi, johon on sekoitettu rikkiä tai muita lisäaineita. Yleisimmin käytetyt tiivisteet toimivat usein laajoissa käyttöolosuhteissa, joissa tiivisteeseen kohdistuva paine on 80 MPa, liukunopeus 15 m/s ja lämpötila vaihtelee noin -65 ja +260 °C:n välillä ( Nikas, 2010; Mahankar and Dhoble, 2021). Lisäaineilla pyritään saavuttamaan optimaaliset ominaisuudet tiivisteelle. Lämpötilakestävyys on yksi tärkeä ominaisuus (kuva 3 alapuolella).



**Kuva 3.** Elastomeerien lämpötilakestävyys (Techne, 2014)

Alla näkyvässä pyramidissa (kuva 4) näkyy joitain yleisesti käytettäviä tiivistemateriaaleja, jotka on jaoteltu ominaisuuksien, käyttökohteen ja hinnan mukaan. Violetit materiaalit ovat kirjoittajan omia lisäyksiä pyramidisiin. Seuraavana käyn lävitse näistä materiaaleista ne, jotka ovat merkittävimpiä hydraulisissa soveluksissa sekä esitellään muutamia pyramidissa mainitsemattomia materiaaleja. Käyn läpi muun muassa joidenkin korkean suorituskyvyn materiaalien ominaisuuksia ja käyttökohteita. Keskitymme lähinnä siis teknisten muovien ja erikoismuovien käsittelyyn, joita käytetään tiivistemateriaaleina. Pyramidin maailmanlaajuisesti eniten valmistetut muovit kaikkiin käyttötarkoituksiin ovat LDPE, HDPE, PP, PVC, PS, Nylon, PTFE ja TPU (Millholland, 2016).



**Kuva 4.** Polymeerimateriaalit jaoteltuna käyttökohteen mukaan, ("Muovien luokitus," 2023)

Merkittävimmät kestumuovit vaativiin sovelluksiin ovat esimerkiksi PTFE ja UHMWPE, jotka kestävät kulumista paremmin, estävät liukuliikettä ja rakopuristumista, omaavat pienemmän kitkan ja laajemmat käyttölämpötilat kuin esimerkiksi elastomeerit (Nikas, 2010). Lisäksi erikoismateriaaleina erittäin vaikeisiin olosuhteisiin löytyy PAI, PEEK, PI ja POM. Kestumuovit ovat materiaaliryhmistä suurin, mutta tiivisteiden valmistamiseen käytetään useammin elastomeereja niiden elastisten ominaisuuksien vuoksi (Makeitfrom, 2021).

Polyeetterketoniperheeseen kuuluvat PEEK, korkean lämpötilan PEEK, PEK, PEKK, PEKKEK ja PAEK (Drakeplastics, 2021), joista PEEK on monipuolisin ja käytetyin. **Polyeetterieetteriketoni** eli PEEK on kiteinen kestumuovi, jolla on erittäin hyvät liukuominaisuudet sekä korkea kemikaalien ja lämpötilan kesto (Muoviteollisuus ry, 2023). PEEK voi toimia jatkuvasti 260 celsiuksen lämpötiloissa. Sen lasittumislämpötila on 143 celsiusta ja sulamislämpötila on noin 341 celsiusta (Drakeplastics, 2021; Ensingerplastics, 2023a). PEEK:n paranneltu versio on PEKEKK eli **polyeetteriketonieetteriketoni**. PEKEKK:stä valmistetuilla tuotteilla on parempi lujuus ja jäykkyys sekä suurempi taivutuslujuus, ja lisäksi korkeampi taivutuslämpötila (Ensingplastics, 2023b). Tämä materi-

aali kestää jatkuvassa käytössä 260 celsiusta. PEEK sietää korkeampaa lämpötilaa mutta kestää huonommin kaasuja kuin esimerkiksi suosittu PTFE.

Polyimidit ovat amorfisia kestumuoveja (voidaan kategorisoida myös kertamuoveiksi), jotka sisältävät imideitä ja ovat kaikki hyvin suorituskykyisiä ja jäykkiä materiaaleja. **Polyimidi** eli PI kestää jatkuvaa käyttöä 300 celsiuksen lämpötiloissa. PEI eli **polyeetteri-imidi** kestää jatkuvaa käyttölämpötilaa 180 asteessa ("Polyeetteri-imidi (PEI)," 2023). PAI eli **polyamidi-imidi** kestää jatkuvia lämpötiloja poikkeavan korkeaan lasittumislämpötilaansa asti eli 260-280 celsiusasteeseen, silti säilyttäen hyvän kemikaalienkeston ja kulutuskestävyyden (Drakeplastics, 2021; Solvay, 2023). Samoin TPI eli **termoplastinen polyimidi** kestää käyttölämpötiloja lasittumislämpötilaansa eli noin 250 asteeseen ja luonnollisen TPI:n taivutuslämpötila on 315 celsiusastetta (PbiAM, 2023).

**Polyasetaaali** eli POM omaa hyvän kulumiskestävyyden. Se kestää erinomaisesti kosteutta, bensiiniä, liuottimia ja monia muita neutraaleja kemikaaleja (Massey, 2003). Massey (2003) on maininnut lisäksi, että materiaalilla on poikkeuksellisen hyvä kestävyys kosteudelle ja kuumalle vedelle. Tätä käytetään esimerkiksi tukirenkaisiin (SKF katalogi, 2014). Korkealaatuisimpienkin polyasetyylien sulamispiste on jo 180 asteessa (Ensingerplastics, 2023c).

Amorfiset kestumuoivit			Puolikiteiset kestumuoivit			Imidoituidut materiaalit		
Hinta:	Korkein	Lämpötilankestävyys:	Hinta:	Korkein	Lämpötilankestävyys:	Hinta:	Korkein	Lämpötilankestävyys:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ultem</li> <li>• Radel R</li> <li>• Polysulfone</li> <li>• Noryl</li> <li>• Polycarbonate</li> <li>• ABS</li> <li>• Polystyrene (HIPS)</li> <li>• Kydex</li> <li>• PVC</li> <li>• PETG</li> <li>• Acrylic</li> </ul>	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radel R</li> <li>• Ultem</li> <li>• Polysulfone</li> <li>• Polycarbonate</li> <li>• Noryl</li> <li>• Acrylic</li> <li>• Polystyrene (HIPS)</li> <li>• ABS</li> <li>• Kydex</li> <li>• PVC</li> <li>• PETG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PPS</li> <li>• PEEK</li> <li>• PVDF (Kynar)</li> <li>• PTFE</li> <li>• PET</li> <li>• PBT</li> <li>• Nylon</li> <li>• Acetal</li> <li>• UHMW-PE</li> <li>• HDPE</li> <li>• LDPE</li> <li>• Polypropylene</li> </ul>	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PPS</li> <li>• Nylon</li> <li>• Acetal</li> <li>• PVDF (Kynar)</li> <li>• PTFE</li> <li>• PET</li> <li>• Polypropylene</li> <li>• HDPE</li> <li>• LDPE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vespel</li> <li>• Polyimide Shapes</li> <li>• PAI (polyamide-imide)</li> </ul>	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vespel</li> <li>• Polyimide Shapes</li> <li>• PAI (polyamide-imide)</li> </ul>
	Matalin			Matalin			Matalin	

**Kuva 5.** Kestumuovien hinta ja lämpötilankesto, mukailen (Curbellplastics, 2023)

**Polytetrafluorieteeniä** eli PTFE:tä (kauppanimellä Teflon) alettiin käyttää enemmän 1950-luvulla, koska niillä huomattiin olevan hyvä kemikaalien kestävyys ja samalla matala kitkakerroin, vain vähäinen stick-slip-ilmiö ja korkea



lämpötilankesto ( SKF Group, 2014, s.27; Muller, 2019). Parhaiten PTFE tunnetaan matalasta kitkakertoimesta, mikä johtuu materiaalin pinnan huokoisuudesta ja alhaisesta pintaenergiasta (Nikas, 2008). PTFE on monella tapaa sopivin tiivistemateriaali haastaviin oloihin ominaisuuksiensa vuoksi (Parker katalogi, 2011). Esimerkiksi sopiva jatkuva käyttölämpötila materiaalilla on 260 celsiusta ja sulamispiste on 342 celsiusta.

PTFE:n rajoituksia ovat kuluminen ja mekaaniset ominaisuudet (esimerkiksi rakkopuristuvuus), joita usein parannellaan lisäaineilla, koska materiaali on pehmeämpää (Nikas, 2010). Tämä johtuu materiaalin matalasta lasittumislämpötilasta 27 celsiusta. Lisäaineilla, kuten lasi ja hiilikuitu, parannetaan lujuutta ja jäykkyyttä. Ominaisuuksia voidaan parantaa, mutta perusmateriaali määrää silti lasittumislämpötilan.

Mullerin mukaan PTFE kestää painetta 80 MPa, nopeutta 15 m/s ja lämpötiloja -50 celsiuksesta 200 celsiukseen. Tämän materiaalin valmistaminen on kallista ja sen ominaisuudet riippuvat paitsi lisäaineista niin myös siitä, miten se on lämpökäsitelty sintrauksen jälkeen. Näitä tiivisteitä käytetään esimerkiksi huulitiivisteinä ja hydraulitiivisteinä. Toinen merkittävä kestopuovi on **ultrasuurimolekyylinen polyeteeni** eli UHMWPE. Tätä materiaalia käytetään esimerkiksi tukirenkaissa ja ohjainrenkaissa (SKF katalogi, 2014). Huonona puolena tämän materiaalin sulamispiste on jo lämpötiloissa 130-136 celsiusta.

Kertamuovit ovat lujempia ja jäykempiä kuin muut materiaalit sekä samalla vähemmän elastisia (SKF katalogi, 2014). Kertamuovit eivät pehmene niiden vahvojen kovalenttisten sidosten ansiosta. Tämän takia niitä käytetään sovelluksissa, joissa lujuus on tärkeämpää kuin joustavuus eli esimerkiksi ohjausrenkaissa ja tukirenkaissa. Jotkin korkeampaa lämpötilaa sietävät polyuretaanit lukeutuvat kertamuoveiksi jäykkien ominaisuuksiensa puolesta.

**Polyuretaanit** (PU tai PUR) ovat erilaisia muista tiivistemateriaaleista, koska ne ovat muodostuneet molekyylitasolla kovalenttisten ristsidosten sijaan vetysidoksilla (Muller, 1998). Nämä suhteellisen heikot sidokset saavat materiaalin käyttäytymään samoin kuin kestopuovit. Mullerin (1998) mukaan sidokset ratkeavat noin 200 celsiuksen lämpötiloissa ja polyuretaani palaa plastiseen eli muovautuvaan muotoon. Polyuretaani ei siis sovi korkean lämpötilan sovelluk-

siin. Polyuretaaneissa yhdistyy elastomeerien elastisuus ja kestumuovien muovattavuus (SKF katalogi, 2014, s.26). Polyuretaanien korkea repäisyjuuus ja kulutuskestävyys johtuvat vetysidoksista. Polyuretaaneja käytetään pääasiassa hydraulisissa sovelluksissa ja erityisesti dynaamisissa tiivisteissä.

Elastomeereja käytetään usein esimerkiksi pyörivien akseleiden tiivistämiseen, staattisissa tiivisteissä (kuten o-renkaissa) sekä dynaamisissa hydraulisissa sovelluksissa (SKF katalogi, 2014, s.27). Elastomeerit kestävät hyvin lämpötiloja (200 celsiusta tai yli) ja hydrauliiKANesteitä. Suositujia elastomeereja ovat esimerkiksi NBR, HNBR ja FKM (katso taulukko 1).

**Taulukko 1.** *Elastomeerien ominaisuuksia*

Materiaali	Jatkuva käyttölämpötila	Maksimilämpötila	Minimilämpötila	Kovuus
NBR	100	130	-50	50-100 (shore A)
HNBR	150	180	-30	50-95 (shore A)
FPM/FKM	205	250	-40	50-95 (shore A)
EPDM	130	150	-40	30-85 (shore A)
FEPM	-	220	-10	87 (shore A)

**Nitriilikumi eli NBR** kestää kulutusta ja mineraaliöljyjä (Mahankar and Dhoble, 2021). Se sopii matalan käyttölämpötilan sovelluksiin kuten u-kuppitiivisteisiin, huulitiivisteisiin ja hydraulisiin tiivisteisiin. Se on yleisimmin käytetty tiivistemateriaali kohtalaisiin lämpötiloihin (Muller, 1998). NBR sietää myös hyvin öljyjä ja hiilivetypolttoaineita ("Nitrile / NBR | O-Ring," 2023).

Edellistä paremman lämpötilan- ja kemikaalinsietokyvyn omaava materiaali on **hydrogenoitu nitriilibutadieenikumi eli HNBR** (Muller, 1998). Hydrogenoitu nitriilikumi eli HNBR on erittäin elastinen korkean suorituskyvyn tiiviste, mikä kestää lisäksi hyvin kemikaaleja ja erittäin hyvin kulumista (Mahankar and Dhoble, 2021). Mahankaran mukaan huonoina puolina se menettää vanheneamisen myötä elastisuuttaan ja palautumiskykyään. Tätä materiaalia käytetään muun muassa autoteollisuudessa, ilmailussa ja öljykentillä.

**EPDM eli etyleenipropyleenidieenikumi** omaa matalan lasittumislämpötilan (Mahankar and Dhoble, 2021). Lisäksi se sietää hyvin erilaisia ympäristöolosuhteita ja omaa hyvän sähkönjohtavuuden. Se on hyvä materiaali kuumalle vedelle sekä höyrylle ja fosfaattiesterille, mutta se ei sovi mineraaliöljylle eikä diesteereille (Muller, 1998).

**Fluorokumi eli FKM** (FPM tai kauppanimeltään Viton) on monipuolinen materiaali, jolla on erinomainen lämmön-, kemikaalien ja hapettuvuuden kestävyys (Mahankar and Dhoble, 2021). Sillä on alhainen kaasunläpäisevyys ja puristuslujuus. Se kestää rajallisesti vettä, kaasuja, metanolia, laimeita happoja ja emäksiä (Muller, 1998). Edellisestä paranneltu versio eli **tetrofluoroelastomeeri eli FFKM** (tai FFPM) omaa äärimmäisen hyvän kemikaalien ja lämpötilan keston. Muller huomauttaa, että materiaali on kallis ja lisäksi sen palautumisoiminaisuudet voivat olla huonommat.

**Tetrafluorieteenipropyleeni eli FEPM** (TFEP ja kauppanimeltään Aflas) on korkean lämpötilan materiaali, joka lisäksi kestää hyvin kemikaaleja, vettä ja kaasuja (Muller, 1998). Tällä materiaalilla ei välttämättä ole yhtä hyvät palautumisoiminaisuudet kuin muilla elastomeereilla. Materiaali on ideaalinen öljy- ja kaasualan tiivisteissä (M-seals, 2023).

Termoplastiset elastomeerit (TPE) sisältävät **termoplastiset polyuretaanit** (TPU), jotka käsittävät pääosin pehmeät polyuretaanit eli termoplastiset polyuretaanit. Termoplastisia elastomeereja valmistetaan erilaisilla erikoisominaisuuksilla, joihin kuuluvat erinomainen kemikaalien ja hydrolyysin kestävyys, puristuskestävyys tai alhaisen kitkan ja kulutuskestävyyden vuoksi (SKF katalogi, 2014). Näissä termoplastisissa polyuretaaneissa (TPU) yhdistyy elastomeerien elastiset ominaisuudet ja kestumovien prosessoitavuus. Tämän materiaalin sovelluskohteita ovat esimerkiksi männän tiivisteiden liukurengas, tukirenkaat ja varren tiivisteet (SKF katalogi, 2014). Yksi termoplastinen elastomeeri, jota myös käytetään hydraulitiivisteissä on TPC eli termoplastinen polyesterielastomeeri. Esimerkiksi tästä materiaalista valmistettu tukirengas kestää maksimissaan 120 celsiuksen lämpötiloja (SKF katalogi, 2014).

**Silikoneja** käytetään tiivisteinä (VMQ ja FVMQ). Silikonit lasketaan elastomeereiksi. Silikonitiivisteitä löytyy esimerkiksi kovuuksilla 55A-70A ("McMaster-

Carr,” 2023), jotka kestävät 200 celsiuksen lämpötiloja. Joitain silikoneja voidaan käyttää jopa 300 celsiuksen lämpötiloissa (Impomet, 2023). Silikoneja ei kuitenkaan voida käyttää kaasutiiviissä sovelluksissa ja lisäksi niiden kemikaalien ja kulutuksen kestävyys on huono (Techne, 2023). Nämä tiivisteet pärjäävät staattisissa sovelluksissa.

**Komposiittimateriaalit** ovat kahden tai useamman materiaalin seoksia, joiden ominaisuuksia pyritään optimoimaan lisäaineilla. Komposiittimateriaaleja käytetään hydraulitiivisteissä, koska materiaalien suhteiden avulla saadaan halutut mekaaniset ja kemikaaliset ominaisuudet tiivistemateriaaleille. Suosittuja komposiittimateriaaleja ovat esimerkiksi pronssitäyteinen tai lasitäyteinen PTFE. Pronssivahvistus pienentää liukukitkaa sekä parantaa siten tiivisteiden kulumiskestävyyttä ja lasivahvistus auttaa rakopuristuvuuden välttämiseen (Nikas, 2010). Lisäksi käytetään ruostumattomalla teräksellä tai grafiitilla täytettyä PTFE:tä. Esimerkiksi tukirenkaat ja koaksiaalitiivisteet tehdään usein lasitäyteisestä PTFE:stä (Muller, 1998).

Erytyisesti PTFE:n sekoitetaan muita aineita, koska raajan PTFE:n ominaisuudet ovat korkealaatuisia jo ennestään. PTFE täytetään yleensä kovemmilla materiaaleilla, koska PTFE altistuu helposti virumiselle eli staattiselle väsymiselle sekä kulumiselle (Parker katalogi, 2011). Useimmat lisäaineet kestävät lämpötiloja 400 celsiukseen asti.

### 2.3 Tiivisteet ja tiivistemallit

Tässä luvussa käydään läpi muutamia eri hydraulitiivistemalleja. Hydraulitiivisteessä on usein kaksi osaa. On liukurengas ja sitten sitä vahvistava o-rengas. Joskus tiivistävyyttä voidaan parantaa esimerkiksi metallijousilla. Vahvisterengas on yleensä elastomeerinen o-rengas (Muller, 1998). Tällä hetkellä tyypillisin dynaaminen tiiviste auto- ilmailu ja meriteollisuudessa on suorakulmainen ja reunoista pyörästetty elastomeerinen tiiviste yhdessä o-renkaan kanssa (Nikas, 2018).

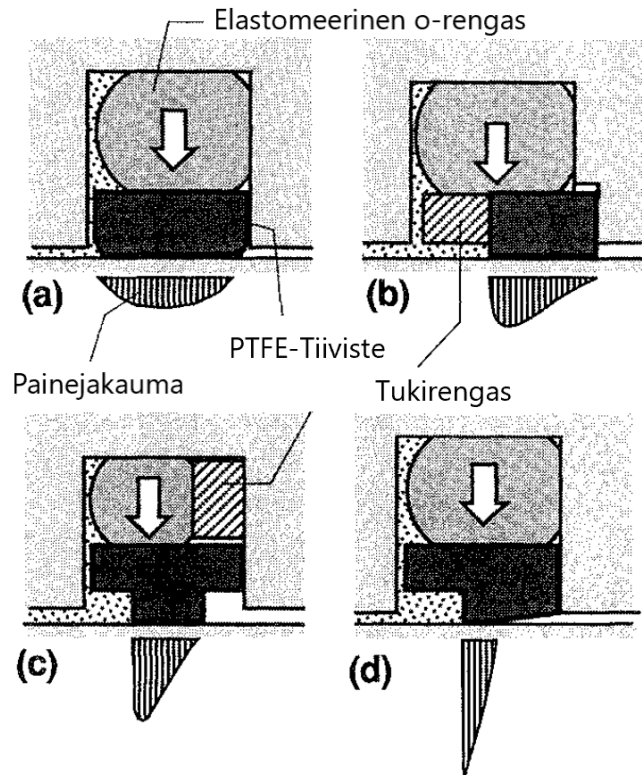
Tiivisteiden materiaaliominaisuuksilla on merkittävin vaikutus tiivisteiden toimintaan, mutta tiivistemallin avulla voidaan näitä ominaisuuksia säätää hieman. Esimerkiksi lämpötilan siirtyminen tiivisteessä, tiivisteiden liikkumisen huomioimi-

nen tiivisteraossa ja voitelukerroksen muodostuminen voidaan huomioida tiivistemallilla. Näin vältytään ennenaikaiselta tiivisteiden kulumiselta tai hajoamiselta.

Vuosina 1960-2000 tutkittiin monia tiivistevaihtoehtoja kuten o-renkaita (toroidit), u-renkaita, askeltiivisteitä, tandemtiivisteitä ja muita (Nikas, 2010). O-renkaat olivat ensimmäisiä tiivisteitä. Ennen kuin tunnettiin elastohydrodynaamisen voitelun mallia niin on suunniteltu ainoastaan ympyrän mallisia o-tiivisteitä, jotka eivät ole paras vaihtoehto tiivisteeksi (Muller, 2019, s. 117-118). Sittemmin on valmistettu erimallisia tiivisteitä, kuten u-tiivisteitä, jotka on optimoitu huomioimaan elastohydrodynaamisen voitelun tarpeet.

Ohuthuulisista u-kuppitiivisteistäkin on nyt jo kuitenkin suurilta osin luovuttu (Muller, 1998). Sittemmin on siirrytty paksumpiin huulitiivisteisiin ja askellettuihin koaksiaalitiivistepareihin. Keskitytään koaksiaalitiivisteisiin, koska niitä suositetaan kaksisuuntaisissa dynaamisissa sovelluksissa. Erilaisia koaksiaalitiivisteitä on nähtävissä kuvassa 6. Mallin (a) tiiviste on koaksiaalinen suorakaiteen mallinen liukutiiviste o-renkaalla vahvistettuna. Tämän tiivisteiden ominaisuudet eivät vielä vastaa varsitiivisteeltä vaadittavia dynaamisia ominaisuuksia ja siksi on suunniteltu vaihtoehdot c-d. Askeleloven avulla pyritään parantamaan tiivisteiden hydrodynaamisia ominaisuuksia (Muller, 1998).

Mullerin mukaan mallien b ja c tarkoitus on maksimoida kosketuspainegradientti tietyssä kohtaa asettamalla o-rengas epäsymmetrisesti. Siis paineen muutosnopeus nestepuolella on pyritty maksimalisoimaan reaktiivisen tiivistyksen luomiseksi. Kuvan d tiiviste on suunniteltu erityisesti huomioiden elastohydrodynaaminen voitelumalli. Mallin d tiiviste kaatuu paikoilleen paineen noustessa, jolloin tiivistyspinta-ala kasvaa.

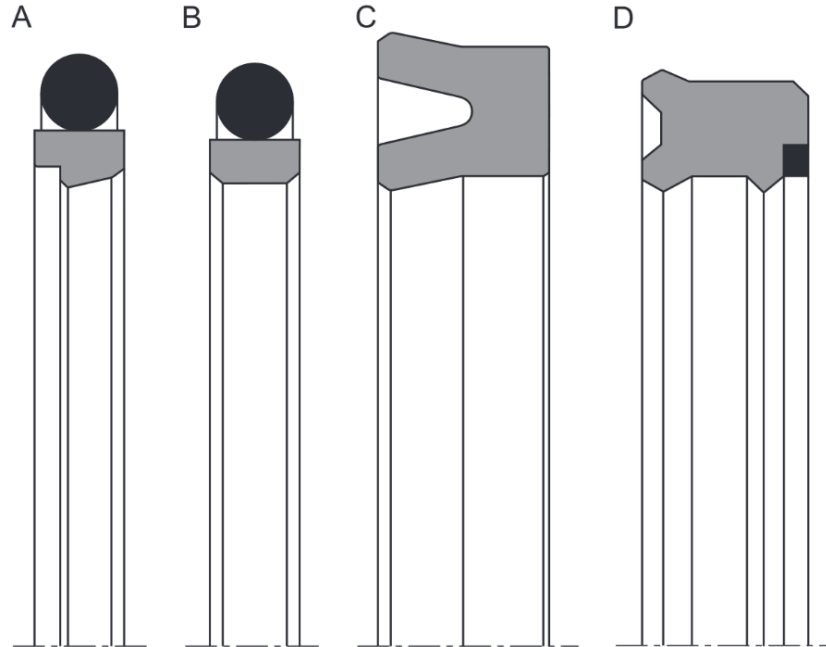


**Kuva 6.** PTFE-koaksiaalitiivisteiden eri muotoja ja tyypilliset paineprofiilit, mukailten (Muller, 1998)

Kuvassa 7 alapuolella on nähtävissä o-renkaalla vahvistettu askeltiiviste (A), o-renkaalla vahvistettu suorakulmainen ja viistetty tiiviste (B), u-kuppitiiviste (C) ja kompakti tiiviste tukirengaalla (D). Esimerkiksi A-tyypin PTFE tiivisteellä on hyvä kitkankesto, vähäisempi vuotaminen ja siten parempi lämpöstabiius, jolloin se soveltuu erityisesti suuren nopeuden sovelluksiin. Mallin A askellovi mahdollistaa sen, että kitka huippu syntyy ainoastaan käynnistyksen aikana eikä mallin B tavoin sekä sisäänvedon että ulostyönön aikana. Kitkataso suurilla nopeuksilla ja käynnistyskitka on tiivistemallin B kohdalla hieman suurempi kuin askeltiivisteiden A kanssa. (Heipl & Murrenhoff, 2015)

U-kuppitiivisteiden eli mallin C tiivisteiden kitkataso osoittautui Heiplin ja Murrenhoffin testeissä näistä tiivisteistä suurimmaksi. U-tiivisteiden hyöty on sen tiivistehuuli, joka mahdollistaa joustavat muodonmuutokset kitkaproessin aikana (Heipl ja Murrenhoff, 2015). Tyypin D tiivisteillä on ajateltu olevan esipuristus, mikä johtaa myös suureen käynnistyskitkaan. Testeissä paljastui, että tyypin D tiivisteiden

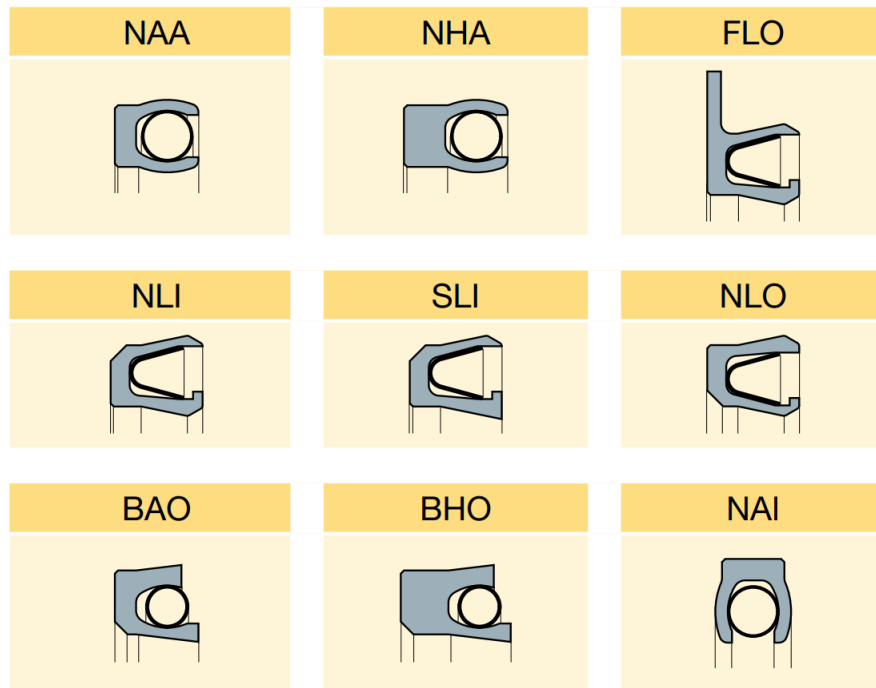
kitka huononee merkittävästi nopeuksien kasvaessa, mutta käynnistyskitka on merkittävästi pienempi, kuin tyypin A tiivisteellä (Heipl ja Murrenhoff, 2015).



**Kuva 7.** Tiivistemalleja (Heipl ja Murrenhoff, 2015)

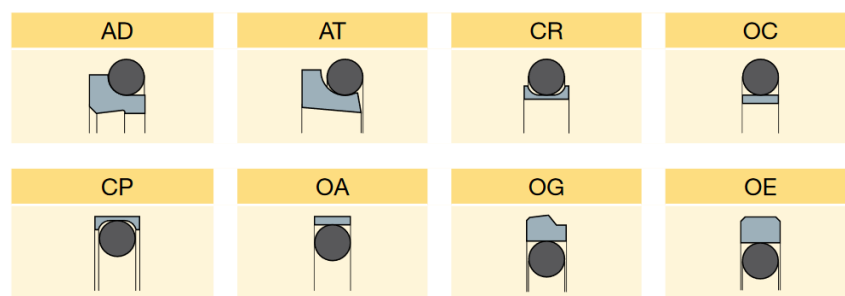
Eräässä tutkimuksessa mitattiin kitkakerrointa D-rengastiivisteiden ja metalliosan välillä, erilaisissa voitelutilanteissa (Zhang ja Zhang, 2016). D-renkaan ongelmaksi pääteltiin muun muassa kitkakertoimen kasvaessa tiivisteiden luoman kosketusjännityksen vaihtelu ja tiivisteiden poikkileikkauksen muodonmuutokset. Nämä huononsivat tiivisteiden tiivistystehoa ja väsymisaikaa.

Tiivistystehon tai tiivisteiden tiivistävyyden parantamiseksi tiivisteiden sisälle voidaan integroida metallinen jousi, joka varmistaa riittävän tiivistävyyden matalassa paineessa, sopivan kulumisen ja lämpösupistumisen kompensoinnin (Parker katalogi, 2011). Kuvassa alapuolella jousi on mallinnettu mustaksi ympyräksi (Kuva 8). Jousi vahvistaa tiivisteiden elastista toimintaa, kun esimerkiksi elastomeerilämpöominaisuudet tai kemialliset ominaisuudet eivät riitä. Vahvistettua huulitiivistemallia pidetään hyvänä vaihtoehtona staattisiin tai hitaan nopeuden sovelluksiin, jos tiivisteeseen kohdistettu paine on suuri.



**Kuva 8.** Jousitetut tiivisteet (Parker katalogi, 2011)

Liukutiivisteet ovat tiivisteitä, jotka sisältävät polymeerirenkaasta ja elastomeerisesta jännityselementistä. Tämä on tyypillisin käytössä oleva malli dynaamisissa sovelluksissa (kuva 9). Polymeerikomponentit valmistetaan usein PTFE:stä, kun taas elastomeerinen viritin voidaan valmistaa esimerkiksi NBR, HNBR, EPDM tai FKM materiaaleista (Parker katalogi, 2011). Materiaali valitaan olosuhteiden mukaan.

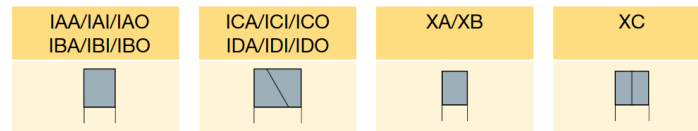


**Kuva 9.** Perinteiset viritetyt liukutiivisteet (Parker katalogi, 2011)

Tukirenkaat (tai antiekstruusiorenkaat) tehdään usein kovista polymeereistä (kuva 10). Niiden tehtävä on tukea tiivisteitä korkeissa paineissa ja estää tiivisteiden rakopuristuminen (Nikas, 2008). Tämän renkaan tehtävänä ei ole tiivistää vaan täyttää puristusväli ja estä pehmeämmän tiivisteiden puristumisen tai haajoaminen rakoon. Tyypillisiä materiaaleja ovat vahvistettu PTFE, PEEK ja vah-



vistettu PEEK. Lisäksi tarjolla on ohjausnauhoja, jotka estävät tiivisteiden ja sylinterin kosketuksen edestakaisissa sovelluksissa. Ohjausnauhat tehdään tyypillisesti vahvasti täytetystä PTFE:stä. Tämä voi olla halvempi vaihtoehto sen sijaan, että sovellukseen sijoitetaan koko tiiviste vahvemmassa materiaalista.



**Kuva 10, Erilaisia tukirenkaita (Parker katalogi, 2011)**

Pakatut tiivisteet (eng. Chevron sealing rings) ovat tiivistesarja, jossa tiivisteitä asetetaan useita linjaan. Tyypillisesti sarja koostuu tiivisteestä, jonka jälkeen laadotaan V-muotoisia tiivisteitä, kunnes linja päätetään tukirenkaalla. Ensimmäisen tiivisterenkaan puristuminen aktivoi V-renkaat tiivistymään, joten tämän tiivisteiden toimivuus on kriittistä. Esimerkiksi Trelleborgin mukaan tällainen setti voi toimia maksimissaan 200 celsiusen lämpötiloissa, 40 MPa paineessa ja 0.5 m/s nopeuksissa (Trelleborg, 2022, s. 411).

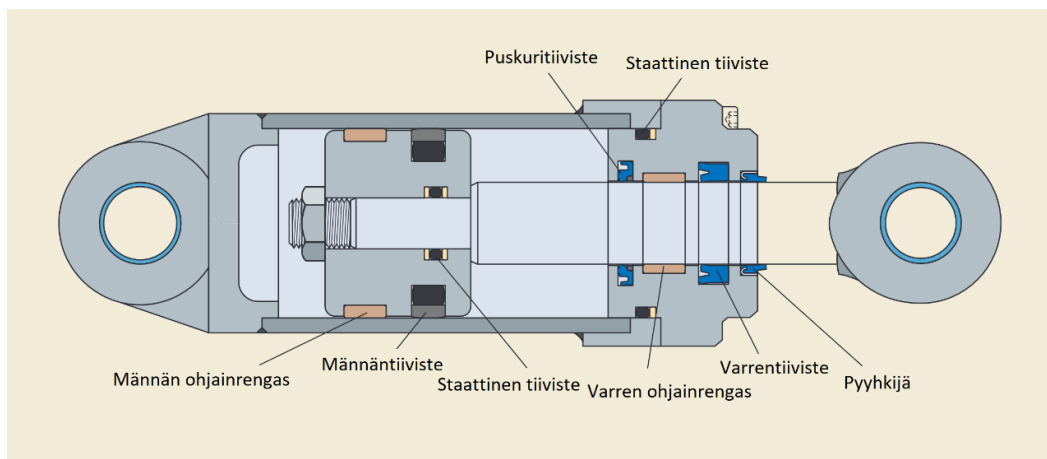
## 2.4 Hydraulitiivistämisen perusteet

Hydraulitiiviste on usein polymeeristä tai termoplastisesta elastomeerista valmistettu elementti (Nikas, 2010), jota käytetään nestepaineen avulla toimivissa systeemeissä, kuten hydraulisylintereissä. Näitä tiivisteitä käytetään muun muassa estämään vuotoja systeemissä ja siten mahdollistamaan tehokas voimansiirto (Mahankar & Dhoble, 2021). Tiivisteet myös estävät epäpuhtauksien pääsyä systeemiin, systeemin nesteiden ja kaasujen sekoittumisen sekä osien kulumisen. Ympäristöystävällisempien, luotettavammin toimivien ja pidemmän huoltovälin tiivisteiden tutkimus on kannattavaa (Guan et al., 2011; Shen et al., 2016; Angerhausen et al., 2019).

Hydraulisissa (neste paineen luojana) ja pneumaattisissa (kaasu paineen luojana) systeemeissä käytetään tiivisteitä varren, männän ja pumpun tiivistyksessä (Shen et al., 2016). Näitä hydraulisia laitteita käytetään ilmailutekniikassa, konepajateollisuudessa, öljyn hyödyntämisessä, maataloudessa, kuntoilussa sekä muissa teollisuuden ja arjen sovelluksissa. Sovelluskohteita voisivat olla esi-

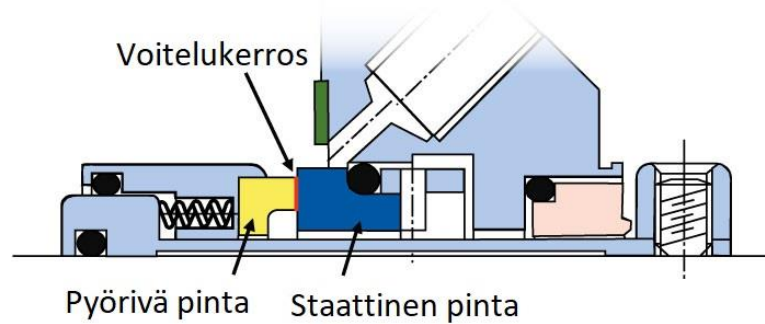
merkiksi hydraulinen tunkki, hydraulipuristimet ja -sekoittimet, jarrusysteemit, venttiilit, kuljettimet ja testauslaitteet. Sovelluskohteissa hydraulisen tiivisteiden tarkoitus on aina estää voiteluaineen tai suljetun väliaineen vuoto (Wang et al., 2019).

Tiivisteet jaetaan usein kahteen pääryhmään, jotka ovat staattinen ja dynaaminen. Staattinen hydraulitiiviste toimii tilanteissa, joissa kappaleet eivät liiku toistensa suhteen ja tarkoituksena on estää vuotoja. Tyypillisesti nämä tiivisteet on sijoitettu männän ja männänvarren väliin tai sylinterinpään ja sylinterin ulkoputken väliin (SKF katalogi, 2014, s. 14). Näitä tiivisteitä ovat esimerkiksi männän staattinen tiiviste ja tiivistepesän staattinen tiiviste (kuva 11, kuvassa nimellä ”staattinen tiiviste”). Dynaamisia tiivisteitä käytetään, kun kahden kappaleen välillä on liikettä. Esimerkiksi erilaisia dynaamisia tiivisteitä ovat männäntiivisteet, männänvarren tiivisteet, ohjainrenkaat, pyyhkijät ja puskuritiivisteet, jotka näkyvät alla olevassa kuvassa 11.



**Kuva 11.** Hydraulisyylinterin tiivisteet, mukailen (SKF katalogi, 2014, s. 15)

Lisäksi on mekaanisia tiivisteitä (Kuva 12) ja rasvatiivisteitä. Mekaaninen tiiviste sisältää kaksi osaa; tiivistävän stationaarisen osan sekä tätä vasten liikkuvan pyörivän osan (Industrial quick search directory, 2023). Tällainen tiiviste tiivistää neljästä kohtaa, joista tiivistyksen kannalta tärkein kohta on pyörivän ja paikallaan olevan pinnan välissä, jotka on kuvassa nimetty ”pyörivä pinta” ja ”staattinen pinta”. Rasvatiivisteitä käytetään liikkumattomien ja liikkuvien osien välillä estämässä materiaalin siirtymisen ei haluttuihin osiin konetta.



**Kuva 12.** Mekaaninen tiiviste, mukailten (*“What is a Mechanical seal?”* 2015)

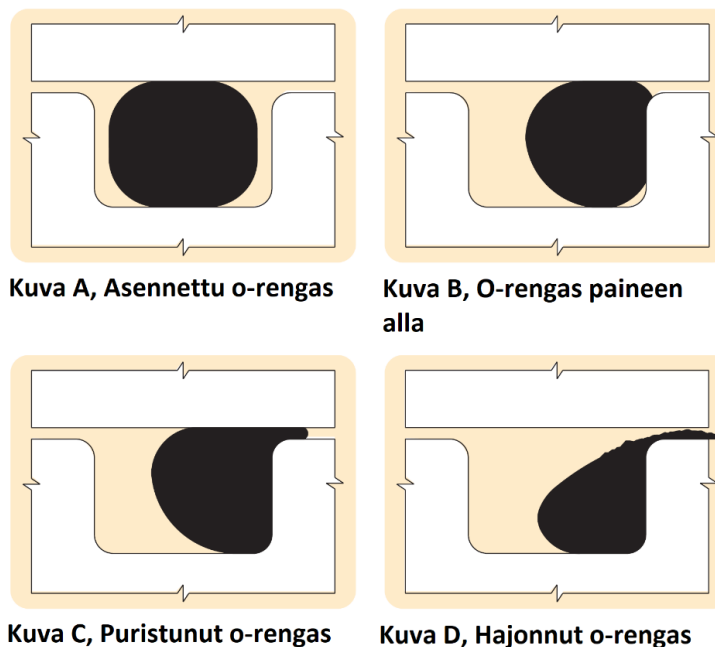
Hydraulisia tiivisteitä on sekä edestakaisen että pyörivän liikkeen laitteisiin. Pyörivissä sovelluksissa suositaan niin kutsuttuja huulitiivisteitä. Rotaatiossa tiiviste kulkee hyvin pienellä alueella nopeasti, joten kitkan aiheuttama lämpötilan nousu on tärkeää johtaa eteenpäin (SKF katalogi, 2014). Lämpötilan johtaminen huomioidaan muun muassa tiivisteiden materiaalin ja muodon avulla.

Hydraulisen tiivisteiden valinnassa on otettava huomioon muun muassa sovelluksen varren nopeus, lämpötila, paine, varren kovuus, varren pinnankarheus, akselin ja reiän toleranssit, systeemin värinä ja voiteluaine (Industrial quick search directory, 2023). Tiivisteiden ominaisuuksista pitää tarkistaa kulutuskestävyys, puristuslujuus, repimislujuus, läpäisykestävyys ja vetolujuus (Sealing Australia, 2014). Puristuslujuus tarkoittaa polymeerin kykyä palautua sen jälkeen, kun siihen on kohdistettu voimia. Repimislujuus taas viittaa polymeerin kykyyn vastustaa leikkautumista ja vetolujuus siihen paljonko tiiviste venyy ennen rikkoutumista (repeytymistä). Läpäisykestävyys on materiaalin kyky vastustaa kaasun tunkeutumista materiaalin sisään ja kumin huokosiin, mikä aiheuttaa materiaalin turpoamista.

Tiivisteiden valintaan vaikuttavat keskeisesti myös ympäristöolosuhteet. Olosuhdemuuttujia voivat olla systeemin lämpötila, paine, pintojen liikenopeus, pintojen karheus sekä ympäristön nesteet ja kaasut (Nikas, 2008, s. 12 –14). Nikas:n mukaan tiivisteiden ominaisuuksista merkittäviä ovat sen mekaaniset, kemialliset ja fyysiset ominaisuudet. Erityisen haastavaa voi olla esimerkiksi dynaamisen tiivisteiden valinta, kun tiivisteiden avulla halutaan luoda materiaalien välille oikean paksuinen voitelukalvo. Yllättävä ja nopea tiivisteiden kuluminen, joka voi olla seurausta voitelukalvon väärästä paksuudesta, voi olla käyttösovellukselle kohtalokas.

Sopivaa tiivistettä valittaessa tärkeintä on kuitenkin huomioida tiivisteiden vuoto, kitka ja puristuminen (Nikas, 2008). Vuoto kuvaa kuinka tehokkaasti tiiviste tiivistää eli erottaa kaksi tilaa. Kitkalla tarkoitetaan liikettä vastustavaa voimaa. Puristumisella tarkoitetaan tiivisteiden puristumista ei-toivotusti tiivistysrakoon tai seiniä vasten, jolloin syntyy jännityskeskittymiä tiivisteiden sisälle. Nikas:n tutkimuksessa havaittiin, että puristumista tapahtuu väistämättä ja siihen ehdotettiin ratkaisuksi joko tiivisteitä pyöristetäillä tai viistetyillä päillä tai tukirenkaiden käyttöä. Lisäksi puristumista voidaan vähentää käyttämällä komposiitista tehtyä tiivistettä esimerkiksi PTFE-elastomeeri-tiivistettä.

Rakopuristuminen voi hajottaa tiivisteiden. Liian suuri paine tai tiivistysrako voivat johtaa tiivisteiden puristumiseen (Sealing Australia, 2014). Puristumisen vastustamisessa merkittävää on tiivisteiden kovuus (shore D) ja kemialliset ominaisuudet (SKF katalogi, 2014). Korkeamman kovuuden on osoitettu vähentävän kulumista ja puristumista (Nikas, 2010). Puristumista voidaan estää konkreettisesti tukirenkailla. Alla olevassa kuvassa (Kuva 13) on esimerkki rakopuristumisesta. Kuvassa tukirengas voitaisiin lisätä o-renkaan ja seinämän välille. Puskuritiivisteiden lisääminen systeemiin on harkinnan arvoisin asia erityisesti kuumiin ja korkean paineen staattisiin olosuhteisiin.



Kuva A, Asennettu o-renkas

Kuva B, O-renkas paineen alla

Kuva C, Puristunut o-renkas

Kuva D, Hajonnut o-renkas

**Kuva 13.** Puristusväli eli "e-gap" esitettynä, mukailten (Sealing Australia, 2014)

Polymeeristen tiivisteiden kovuutta mitataan erityisesti A ja D Shore-kovuuksilla. Mitä suurempi kovuus sitä suurempi kirjain ja numero. Esimerkiksi Shore A 25 tarkoittaa kuminauhaa, Shore A 70 useimpia o-renkaita ja shore A 90 hydraulisia u-tiivisteitä (Sealing Australia, 2014). Tiivistemateriaaleista esimerkiksi HNBR, EDPM ja FKM mitataan shore A testillä. PTFE, POM ja PEEK taas testataan shore D mittarilla eli ne ovat kovempia.

Tiedetään, että voitelukalvon syntyminen tiivisteeseen ja tiivistettävän pinnan väliin on yhteydessä iskunpituuteen suhteessa tiivisteeseen kosketusleveyteen (Nikas, 2008, s.19). Jos iskunpituus on alle kaksi kertaa tiivisteeseen kosketusleveyden, hydrodynaamisen kalvon kehittyminen on epätäydellinen. Iskunpituuden ollessa vähintään kaksi kertaa suurempi kuin kosketusleveys niin voitelukalvon muodostuminen onnistuu teoriassa. Tiivisteet altistuvat suurille kitkoille, jos voitelukalvo on vain osittainen. Lisäksi esimerkiksi pinnankarheuden vaikutuksia o-renkaan voiteluominaisuuksiin on tutkittu laajasti ja sillä on todettu olevan suuri vaikutus myös tiivisteeseen vaurioitumiseen (Wang et al., 2021). Nikas:n (2008) mukaan tyypillinen elastomeerisen tiivisteeseen keskimääräinen karheus on noin 1.5  $\mu\text{m}$ , mikä on melko karhea.









Wangin ryhmä tutki omalla laitteistolla pinnankarheuden vaikutuksia (Wang et al., 2021). Heidän tutkimuksessaan todettiin, että pinnankarheudella on suuri vaikutus ja suurin riski o-renkaan vaurioitumiselle on käynnistyksessä, kun sen pitää voittaa lepokitka. Lisäksi saatiin selville, että sammutuksessa kitkavoima tarvitsee aikaa ollakseen tasapainossa. Ilmiötä kutsutaan kumin viskositeetti-voimaksi. Tämä tarkoittaa, että jatkuva nopeuden muutos laitteistossa voi altistaa tiivisteet ennenaikaisille vaurioille.

Toisaalta on myös löydetty, että pinnankarheutta parantamalla ei voida merkittävästi parantaa kitkaa (Nikas, 2008) ja saatetaan jopa lisätä sitä (Huang and Salant, 2016). Huangin ja Salantin tutkimuksessa tutkittiin hydraulista varrentiivistettä olosuhteissa koneistetun varrenpinnan ja heikon voitelun kanssa. Tutkimuksessa todettiin suurimmiksi syiksi tiivisteeseen kulumiselle mikro-ontelot ja liian vähäinen voitelukerros. Liian vähäinen voitelukerros tarkoittaa, että paineistettua voiteluainetta riittää lyhyemmälle matkaa sisään työnnon aikana ja se loppuu kesken. Mikro-ontelot puolestaan vähentävät ulostyönnon nestekuljetusta, mikä edelleen vähentää voitelukerroksen paksuutta ja lisää kulumista. Edel-

listen syiden takia esimerkiksi männänvarren karheuden laskeminen alle 0.05-0.10  $\mu\text{m}$ :n on tarpeetonta (Nikas, 2008, s.32), koska siitä saavutettu hyöty kitkan vähentämiseksi on minimaalinen.

Voitelukalvon paksuus on merkittävässä roolissa, koska se määrittelee tiivisteiden tiivistetehokkuuden ja kitkan suuruuden systeemissä (Xiang et al., 2019). Kalvon paksuus vaihtelee noin 0.1  $\mu\text{m}$ :stä 1 mm:iin ja dynaamisissa sovelluksissa nestekalvojen paksuus on yleensä välillä 0.1-1  $\mu\text{m}$ , (Muller, 1998). Tiivistettä valittaessa on siis tärkeää valita oikea väliaine, jonka viskositeetti ja kemialliset ominaisuudet ovat yhteensopivia ympäristöolosuhteiden kanssa. Lisäksi voitelukerros vaikuttaa voimakkaasti esimerkiksi tiivistekumin ikääntymiseen ja turpoamiseen (Wang et al., 2019).

Alapuolella olevassa kuvassa (Kuva 14) on esitelty graafisesti o-renkaiden tyyppisiä hajoamismenetelmiä. Kaikki esitetyt tapaukset on otettava huomioon jo tiivistettä valittaessa. Kuvassa esitetyt ”puristuminen ja ”puristuslujuus” voidaan välttää sopivan kovalla materiaalivalinnalla ja puristusvälin oikealla mitoituksella. Korkean lämpötilan sovelluksissa merkittävää on huomata termisen hajoamisen sijainti. Kuvassa halkeilevan ja kovettuneen pinnan sijainti kertoo kuumimman alueen. On myös oleellista erottaa ylikuumentumisen sekä valolle ja otsonille altistumisen ero (”O-ring Degradation,” 2022). Ylikuumentuneessa tiivisteessä halkeamat ja säröt menevät joka suuntaan, mutta jos näkyvillä on ainoastaan mikrosäröjä kohtisuorassa niin on kyseessä valolle altistunut tiiviste. Esimerkiksi silikonitiivisteitä ja FFKM-tiivisteitä voidaan kuitenkin käyttää jopa 327 celsiuksen lämpötiloissa.

	Kuva	Hajoaminen		Kuva	Hajoaminen
a		o-rengas	b		Terminen hajoaminen
c		Nopea kaasun purkautuminen	d		Kemiallinen hajoaminen
e		Puristuminen	f		Puristuslujuus
g		Asennusvaurio	h		Kuluminen

**Kuva 14.** Tiivisteiden yleisimpiä hajoamismenetelmiä taulukossa, mukailen (*“O-Ring Failure Chart Troubleshooting Guide by Marco Rubber,”* 2023)

Tiivistämisen perusasiat aletaan tuntea alalla, mutta haasteisiin on törmätty, kun on yritetty tarkemmin mallintaa niiden toimintaa. Esimerkiksi Nikas testasi parametrisessa ja optimointitutkimuksessaan (Nikas, 2018) tiivisteiden käyttäytymistä eri lämpötiloissa. Jatkotutkimusehdotuksissa hän ehdotti parametrisen tutkimuksen laajentamista seuraaviin asioihin: tiivisteiden suorituskyky suhteessa nesteeseen, tiivisteiden kuluminen, suorituskyky lasittumislämpötilassa ja tiivisteiden käyttöä ennustaminen.

### 3. SOVELLUKSIA

Olosuhteet vaikuttavat tiivisteiden toimintaan merkittävästi, kuten työn Teorialuvusta kävi selväksi. Seuraavissa kappaleissa keskityn tarkemmin lämpötilan ja hieman paineen vaikutukseen tiivisteiden toimintaan. Merkittävimpänä luvun löydöksenä mainittakoon se, että elastomeerien materiaaliominaisuudet rajoittavat niiden käyttölämpötilat -65 ja 250 celsiusasteen väliin sekä alle 80 MPa paineisiin (Nikas, 2018). Lisäksi toisen lähteen mukaan polymeerien lämmönkestävyys pysyy alle 300 celsiusasteen (Pinedo et al., 2018). Tämä antaa selkeän rajauksen polymeerien toimintaympäristölle, vaikka polymeerien ominaisuuksia voidaan muokata lisäaineilla.

#### 3.1 Lämpötilan vaikutus

Lämpötilalla on suuri vaikutus tiivisteiden toimintaan, mutta emme esimerkiksi edelleenkään osaa tarkkaan mitata kitkan aiheuttamaa kuumenemistä. Useita simulointimalleja on luoto lämpötilan selvittämiseksi, mutta todellisissa työoloissa syntyneiden leimahduslämpötilojen suuruudet ovat edelleen selvittämättä (Pinedo et al., 2018). Seuraavana käydään läpi muutamia tutkimuksista saatuja tuloksia ja johtopäätelmiä lämpötilan vaikutuksesta. Erityisesti tutkimuksissa keskitytään kitkan luoman leimahduslämpötilan vaikutuksiin, koska ne ovat vaikeasti ennustettavissa.

Korkeat lämpötilat kiihdyttävät tiivisteiden ikääntymistä ja lisäävät mahdollisten vaurioiden esiintymistä merkittävästi. Polymeereillä terminen vanheneminen huonontaa merkittävästi materiaalin mekaanisia ominaisuuksia kuten sitkeys ja elastisuus, ja aiheuttaa siten suorituskyvyn heikkenemistä (Mahankar and Dhoble, 2021). Lämpötila vaikuttaa merkittävästi myös tiivisteaineen viskositeettiin.

Terminen vanheneminen tarkoittaa muutoksia materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Siihen vaikuttaa tiivisteiden vanhenemisaika ja lämpötila. Muutokset näkyvät muun muassa materiaalin kovuudessa, taipumislujuudessa, paineenkes-

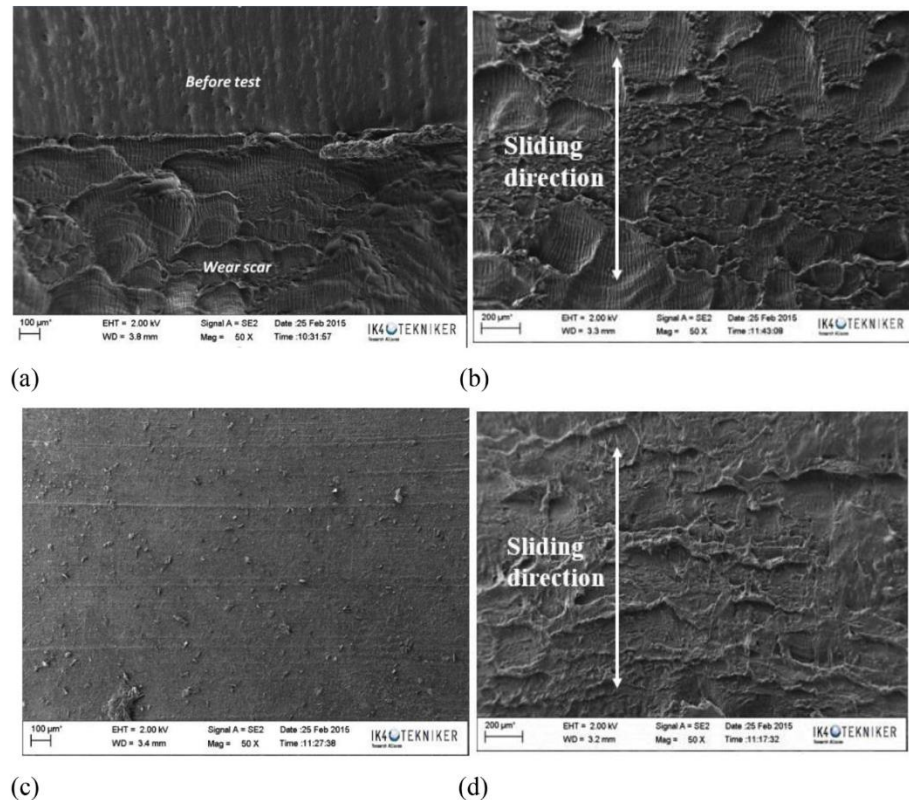


tossa ja venymislujuuudessa. Lopulta materiaalin kemiallisten ominaisuuksien rajat tulevat vastaan ja esimerkiksi SKF:n mukaan kaikki fluoroelastomeerit (kuten FFK, FFKM ja PTFE) vapauttavat vaarallisia kaasuja yli 300 celsiuksen lämpötiloissa (SKF katalogi, 2014).

Mahankar kokosi katsausartikkelissaan kokonaiskuvan keskitason ja korkean lämpötilan tiivisteiden hajoamisesta (Mahankar ja Dhoble, 2021). Kootuissa tutkimuksissa tutkittiin eniten materiaalien HNBR, EPDM ja NBR käyttäytymistä normaalista huoneenlämmöstä 200 celsiukseen. Tiivisteiden ikä keskiraskaissa ja raskaissa sovelluksissa todettiin lyhyemmäksi. Esimerkiksi materiaalikovuus ja vetolujuus kasvavat korkeissa lämpötiloissa, mutta huononevat ajan kanssa ja materiaalit alkavat turvota. Syynä tälle pidetään korkean lämpötilan aiheuttamaa liiallista ristosilloittumista, polymeeriketjujen pilkkoutumista ja hapettumista. Lisäksi ikääntymisen seurauksena tiivisteiden puristuslujuuden havaittiin kasvaneen, mutta murtovenymän taas pienentyneen.

Pinedon mukaan polymeerien lämmönkestävyys pysyy alle 300 celsiusasteen. Pinedon kokeellisessa tutkimuksessa testattiin kitkan aiheuttamia kosketuslämpötiloja matalaa lämpötilaa sietäviin materiaaleihin TPU ja NBR (Pinedo et al., 2018). Tutkimuksessa havaittiin, että kontaktilämpötilan nousu kumin ja teräksen rajapinnoilla on melko huomattava dynaamisessa sovelluksessa ja se vaikuttaa elastomeerin tribologiseen suorituskykyyn. Esimerkiksi hydraulivarren kromipinnoitteen huomattiin johtavan noin 10 astetta korkeampiin lämpötiloihin tutkituissa polymeerissä.

Kyseisessä liukukokeessa terästä vasten kerättiin lämpötiladata infrapunakameralla, josta lämpötilakäyriä analysoimalla voitiin tarkastella kitkakäyttäytymistä. Testissä testattiin myös materiaalien liukunopeuden, kuorman ja teräksen pinnan karheuden vaikutusta. Lämpötilaominaisuudet mitattiin differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrillä (DSC). Elektronimikroskoopilla otetuissa kuvissa (Kuva 15) voidaan nähdä polymeereille tyypillisiä Schallamachin aaltoja, jotka johtuvat polymeerien tahmeasta liukuliikkeestä ja viskoelastisuudesta. Nämä ovat ”irtoamisaaltoja”, jotka näkyvät hankauskokeissa kitkan vaikutuksesta kahden sielen pinnan välillä. Elastomeerien elastisen epävarmuuden uskotaan vaikuttavan aaltojen muotoon.



**Kuva 15.** TPU pinta ennen (a) ja jälkeen (b) sekä NBR pinta ennen (c) ja jälkeen (d), mukailten (Pinedo et al., 2018)

Mahankar ja Dhoble esittelivät lisäksi, kuinka suolavedessä käytetyissä tiivisteissä on havaittu 90 prosentin lasku kimmo- ja leikkausmoduulissa. Tämä johtaa lisäksi materiaalin vetolujuuden, murtovenymän ja kimmomodulin alenemiseen. Tiivistemateriaalin läpikäymiä muutoksia termisen ikääntymisen aikana ovat muun muassa turpoaminen, liukenevat komponentit, hapettuminen, lisäainneiden häviäminen, ristosilloittumisen muutokset ja kuluminen.

Erityisesti korkeassa lämpötilassa materiaalin sisällä on enemmän tilaa, mikä mahdollistaa suuremman kaasumäärän tunkeutumisen tiivistemateriaan. Nopea kaasun paineen lasku (eng. rapid gas decompression) on ilmiö, jossa tiivistemateriaalin rakoihin tunkeutunut kaasu pyrkii paineen muutoksesta ulos materiaalista.

Heipl ja Murrenhoff testasivat PTFE ja PU materiaaleja korkeammassa nopeudessa (Heipl ja Murrenhoff, 2015). Kitkan tutkiminen ja muodon vaikutus olivat tutkimuksen pääkohteena, mutta myös lämpötilan vaikutusta pystyttiin tarkastelemaan. Lämpötilaa kohotettiin 30 celsiuksesta 50 celsiukseen ja vielä 70 celsiukseen. Suurimmat muutokset kitkakäyttäytymisessä huomattiin lämpötilan

noustessa 70 celsiukseen. He päättelivät, että lämpötilan muutos vaikutti erityisesti siten, että kontaktipaine oli merkittävä matalissa lämpötiloissa ja öljyn viskositeetti oli ratkaiseva korkeammissa lämpötiloissa. Tutkittavassa järjestelmässä pyrittiin varmistamaan, että tiivisteiden rungon lämpötila on lähes sama kuin tiivistettävän öljyn lämpötila.

Bae ja Chung pyrkivät kehittämään kokeellista kiihdytettyä kulumistestausmenetelmää (AWT) polyuretaanimateriaaleille (Bae ja Chung, 2017). Tutkimuksen pohjustuksessa tutkijat huomauttivat muun muassa korkean lämpötilan vaikutuksesta kiihdyttävästi hapettumiseen ja syövyttävään kulumiseen. Tämä johtuu siitä, että materiaalien kemiallinen reaktionopeus on korkeissa lämpötiloissa suurempi. Tutkimuksessa tutkittiin kahdella eri testijärjestelmällä polyuretaanin kulumista. Lämpötila asetettiin molemmissa testeissä materiaalin sietokyvyn rajoille eli 100 asteeseen ja paine vaihteli välillä 0 ja 22 MPa. Hydraulisen testijärjestelmän iskunpituus oli 200 mm. Merkittävimmäksi kulumismekanismiksi huomattiin hankaava kulumisen ja tämän seurauksena tiivisteiden toimintakyvyn heikkeneminen.

Toisessa tutkimuksessa taas löydettiin simuloimalla, että tiivisteiden kulumisen vaikutti tiivisteiden pinnalle syntyvien kuumien alueiden siirtymiseen (Gong et al., 2019). Kuumat alueet ja pisteet ovat materiaalissa ilmeneviä termoelastisia epävakauksia, jotka syntyvät kitkajärjestelmissä lämmön vuorovaikutuksesta liukutasossa ja materiaalien lämpölaajenemisesta (Gong et al., 2019). Kuumien alueiden kohdalla havaittiin suurin kulumisen ja kosketuspaine. Kulumisen edessä materiaalin tiivistyspinnalla, myös kuumat alueet etenivät. Testien aikana korkein havaittu lämpötila kuumassa pisteessä oli 213.4 celsiusastetta ja korkein kontaktipaine 17 MPa.

Polyuretaanin kiihdytetyssä käyttöikätestauksessa huomattiin elastomeerin ominaisuuksien, kuten viskoelastisuuden ja materiaalikovuuden merkittävä vaihtelu lämpötilan seurauksena (Kim et al., 2014). Tiivistettä ajettiin 270 km:n matka rasituksen alaisena ja voiteluaineena käytettiin ISO VG 46:ta. Tiivisteprofiilin havaittu suuri vääristyminen lämpötilan kasvaessa johtuu elastomeerin hajoamisen lisääntymisestä lämpötilan noustessa. Kulumisjälkien epätasainen jakautuminen selittyy tutkijoiden mukaan pinnan ja kosketusvoimien epätasaisuudesta sekä hiukkasten käyttäytymisestä. Kulumisjäljet johtavat epätasaisempaan

voiteluun, mikä kiihdyttää kulumista. Tasainen voitelukalvo nimittäin estäisi suuren kitkan synnyn. Korkeammassa lämpötilassa voitelukerroksen viskositeetti laskee, mikä johtaa korkeampaan kitkaan. Huomattavaa oli myös se, että matalilla lämpötiloilla kitkavoiman huomattiin jatkavan laskuaan sisäänajomatkan (noin 50 kilometriä) korkean kitkan jälkeen ja toisaalta korkeissa lämpötiloissa kitkavoimat jatkoivat kasvuaan noin 100-150 kilometrin jälkeen (Kim et al., 2014).

Eräässä tutkimuksessa pyrittiin luomaan termomelastohydrodynaaminen voitelumalli edestakaisille tiivisteille (Xiang et al., 2019). Useissa tutkimuksissa lämpötilan vaikutus voitelukerroksessa on sivuutettu olettamalla voitelukerros saman lämpöiseksi hydraulivarren kanssa. Lisäksi lämpöviskositeettivaikutuksesta puhutaan myös liian vähän. Monia hypoteeseja tiivisteiden käyttäytymiselle on johdettu siten, että voitelukalvo olisi täydellinen.

Mohammed ja kumppanit tutkivat PEEK:n fysikaalisia ominaisuuksia, kun se altistettiin simuloiduille ankarille öljykentän käyttöolosuhteille (Mohammed et al., 2013). Tutkimuksessa huomattiin vetolujuuden kasvua sekä taivutusmoduulin ja lasittumislämpötilan laskua. Käytännössä siis kappale kovettui (muuttui jäykemmäksi), kuten Joule-Gough ilmiön mukaan tapahtuukin. Youngin moduuli kasvoi 175 celsiuksessa altistetulle PEEK:lle, kun seoksessa oli 90% metaania ja 10% hiilidioksidia tai pelkkää hiilidioksidia. Toisaalta 200 celsiuksessa ja 100 prosentin hiilidioksidiseoksessa Youngin moduulin huomattiin laskevan eli kappaleen jäykkyyden laskevan.

Paineen vaikutusten tutkimisessa on viime aikoina tehty ratkaisevia löydöksiä. Painejakauman selvittäminen on ratkaiseva tekijä tiivisteiden kulumisen seurauksissa (Peng et al., 2020). Joustava kumi mahdollistaa hyvin tiivistävän ja kestävästi tiivisteiden. Yleisesti ottaen korkeapaineiset sovellukset helpottavat tiivistyksen parantamista, koska riittävän suuri ja reaktiivinen kosketuspaine tiivistävissä on silloin helppo saavuttaa. Siis tiiviste toimii nopeasti. Korkeassa paineessa käytettävillä kumitiivisteillä on oltava korkea repäisyjuvuus, kovuus ja moduuli, jotta kumitiiviste ei puristu.

Pengin ja muiden tutkimuksissa kehitettiin numeerinen analyysimalli edestakaisien tiivisteiden kitkan aiheuttaman vetovoiman tutkimiseksi (Peng et al.,

2020). Tutkimuksessa pohdittiin polyuretaanisen o-renkaan tutkimista eri paineissa, eri kitkakertoimilla ja eri nopeuksissa. Tuloksena saatiin, että ulostyönön kitka on suurempi kuin sisään työnön. Traditionaalisessa mallissa kitka on oletettu sisään- ja ulostyönössä samaksi ja ulostyönön aikana paine on kasvanut. Todellisuudessa kosketuspaine jakautuu vetovoiman seurauksena siten, että ulostyönön kuiva kontaktipaine on suurempi kuin sisään työnössä, joten ulostyönön kitka on todellisuudessa suurempi. Vertailussa huomattiin, että vetovoima lisää kitkavoimaa ulostyönöllä 37.7% ja laskee sisään työnössä 13.6%. Lisäksi ilmiö oli voimakkaampi, mitä suurempia paineita käytettiin.

Useimmiten valmistajat suosittelivat tukirenkaiden tai tiivisteosien käyttämistä tiivisterenkaan lisäksi. Esimerkiksi PTFE renkaan kanssa suositellaan käytettäväksi PEEK, PAI, POM tai PI tukirengasta korkean paineen nopeissa dynaamisissa sovelluksissa (Parker katalogi, 2011). Yli 260 celsiusen lämpötilan PTFE:n fyysiset ominaisuudet laskevat, lämpövanhenemista tapahtuu ja materiaali hajoaa.

Vaihtoehtoisista tiivistämistekniikoista kirjoittaja ei löytänyt useita ehdotuksia korkeaan lämpötilaan. Eräässä tutkimuksessa oli hyödynnetty magneettisuutta onnistuneesti ekstruusiovälin pienentämiseen (Chen et al., 2021). Käytetty materiaali on MSMA (magnetic shape memory alloy) eli vapaasti suomeksi käännettynä ”magneettinen muotomuistiseos”. Materiaalia on tutkittu enemmän vasta 2000 luvulla ja se onkin vielä varsin uusi löydös alalla, mutta jo laajasti käytetty. Materiaalia on pääasiassa käytetty hydraulisten toimilaitteiden ohjaussysteemeissä, mutta Chen:n ja muiden tutkimuksessa materiaalia käytettiin innovatiivisesti hydraulisylinterin ja männän mikromuodonmuutosten hallintaan. Sylinterin vuotoja hallittiin magneettikenttää ja lämpötilaa muuttamalla. Chen ja kumppanit ennustavat, että materiaali tulee olemaan merkittävä vaihtoehto tulevaisuudessa sen hyvien ominaisuuksien kuten suuren ja nopean palautuvuuden sekä hyvän kulutuskestävyyden takia.

### **3.2 Tulevaisuuden näkymiä**

Teknologian nopea kehitys; korkeat lämpötilat, paineet ja nopeudet luovat tarpeen entistä suorituskykyisemmille tiivistemateriaaleille (Muller, 1998; Pinedo et

al., 2018). Tiivisteiden muodolla, voiteluaineella ja pinnankarheuksilla voidaan parantaa tiivisteiden toimintaa rajoitetusti. Lopulta tiivistemateriaalin ominaisuudet, kuten lämmönkestävyys ja leimahduslämmönkesto eivät enää riitä.

Monet ovat sitä mieltä, että suurimpia haasteita tullaan kohtaamaan juuri dynaamisten tiivisteiden kohdalla (Muller, 1998; Nikas, 2008; Xiang et al., 2019), koska ne ovat monimutkaisuudessaan herkkiä osia muutoksille. Lisäksi esimerkiksi näiden tiivisteiden leimahduslämpötiloja työolosuhteissa on vaikea arvioida, koska hankauskosketuksen lämpötiloja on vaikea mitata kokeellisesti (Pinedo et al., 2018). Pinedon (2018) mukaan kitkan aiheuttamat nopeat lämpötilan muutokset tulevat olemaan haaste tiivisteille.

Monia simulointimalleja on kehitetty, joilla yritetään kuvailla tiivisteisiin vaikuttavien monimutkaisten ilmiöiden keskinäisiä vaikutuksia (Angerhausen et al., 2019; Zhao et al., 2022), jotta systeemien kulumista ja vuotoja voitaisiin monitoroida. Mullerin (1998) mukaan vuotojen täydellinen välttäminen sovelluskohteissa on mahdotonta paitsi fyysisesti niin myös taloudellisesti. Kompromisseja hinnan ja tiivistävyyden välillä tehdään jatkuvasti, mutta hillitsemättömät vuodot ovat merkki siitä, että kompromisseja pitää harkita tarkemmin (Muller, 1998).

Pelkästään nestevirtauksen kulun tutkimiseen sylinterissä vaikuttaa muun muassa painegradientti, lämpötilagradientti, nopeusgradientti, molekyylien vuorovaikutus, painovoima ja inertia (Muller, 1998). Merkittävin näistä on paine- ja kauman vaikutus, joka vaikuttaa vuodon lisäksi myös kitkan ja hankauskuluman suuruuteen (Nikas, 2018). Tässä gradientilla viitataan vektorilukuun, jolla kuvataan muutosnopeutta ja muutoksen suuntaa. Vuoto eli nestevirtaus puristusraon lävitse riippuu lisäksi tiivistereunan kulumisesta, joihin muun muassa vaikuttaa kitka ja voitelukerros (Angerhausen et al., 2019).

Teoreettisissa malleissa on havaittu lisäksi, että tarkkojen vuotomäärien selvittäminen vaatii voitelukalvon paksuusprofiilin selvittämistä (Xiang et al., 2019). Xiang totesi, että ulos- ja sisään työnnon hydrauliohjyvirtauksen nopeusero kertoo todellisen vuotomäärän. Ulostyönnon aikana hydraulitanko työntyy ulkoilmaan ja samoin osa hydrauliohjyistä vuotaa ulos sylinteristä. Sisään työnnon aikana tanko työntää osan ulos vuotaneesta hydrauliohjyistä takaisin sylinteriin.

Vaikeuksia on sekä teoreettisten että kokeellisten tutkimusten ymmärtämisessä ja useat koeasetelmat joutuvat tekemään merkittäviä yksinkertaistuksia (Nikas, 2008). Nikas:n mukaan esimerkiksi voiteluaineen elastohydrodynamiikan vaikutuksia tutkiessa saatetaan keskittyä tarkastelemaan ilmiötä tiivisteiden lineaarisen kimmoisuuden kannalta ja jättää huomiotta kitkan aiheuttama lämpövaikutus. Tai simulaatiomalli saattaa olettaa täydellisen voitelukerroksen ja siten jättää huomiotta metallipintojen kosketuskitkan lämpövaikutuksen (Xiang et al., 2019).

Polymeeristen hydraulitiivisteiden perustavanlaatuisen tutkimus on vielä kesken ja numeerisia simulaatiomalleja kehitetään parhaillaan. Näistä simulaatioista laadukkaimmat ovat monimutkaisia ja raskaita sisältäen numeerista virtausdynamiikkaa (CFD) tai elementtimenetelmää (FEM). Tämän lisäksi tarvitaan lisää kokeellista tutkimusta perinteisten tiivistemallien (esimerkiksi suorakulmainen tiiviste) toiminnan ymmärtämiseksi. Esimerkiksi Mahankara on ehdottanut, että pitäisi keskittyä useiden hajoamismenetelmien kokonaisuuden tutkimiseen enemmän kuin monimutkaisten osien käyttäytymisen selvittämiseen.

Polymeerien kulumiskäyttäytymisen säännöt tunnetaan, mutta esimerkiksi sopivia testijärjestelmiä etsitään vielä. Kulumiskäyttäytymisen tunteminen olisi hyödyllistä monilla aloilla ja mahdollistaisi tiivisteiden vaihdon ja vaurioitumisen paremman ennakkoinnin. Kiihdytetty kulumistestaus (AWT) on yksi vaihtoehto kulumisen tutkimiseen, mutta menetelmä on vielä kehitysvaiheessa (Bae ja Chung, 2017).

Tiivistemateriaalien sopivan testijärjestelmän luonti on haastavaa. Esimerkiksi Pinedon ja muiden kitkakokeita soveltamalla voidaan oppia varmasti testaamaan myös korkeamman lämpötilan materiaaleja. Korkean lämpötilan ja paineen materiaalit ovat yleensä jäykempiä, mikä johtaa tehottomampaan tiivistämiseen (hitaampi elastisuus), mutta toisaalta muodon avulla tiivisteestä voidaan saada tiivistävämpi (esimerkiksi U ja X tiivisteet). Lisäksi jousivahvisteisten polymeeritiivisteiden mahdollisuuksia voidaan pohtia.

Tiivistemateriaalien tulevaisuuteen vaikuttavat myös lait. Euroopan kemikaalivirasto eli ECHA on käsittelemässä PFAS-yhdisteiden rajoittamista koskevaa ehdotusta. PFAS yhdisteet tarkoittavat yhdisteitä, joissa hiilivetyketjun vetyatomit on korvattu fluorilla. Ehdotuksen kattamat PFAS-yhdisteet ovat erittäin pysyviä

ympäristössämme ja siten haitallisia (ECHA, 2023). Fluoropolymeerit sisältävät tällaisia yhdisteitä. Lain voimaantulo poistaisi esimerkiksi seuraavat merkittävät vaativien sovellusten materiaalit: FEPM, FFKM, FKM, ja PTFE. Näillä näkymin lakiehdotuksessa on kuitenkin päädytty poikkeukseen erityisesti vaativien tiivistesovellusten kohdalla, koska niille ei ole vielä riittävän toimintakykyisiä vaihtoehtoja olemassa.

Useita polymeerisiä seosmateriaaleja on kehitetty, joilla tiettyjä ominaisuuksia on saatu paranneltua hieman. Lisäksi tiivisteympäristön jäähdytyksellä voidaan hidastaa tiivisteiden ikääntymistä tai vaihtoehtoisesti tiivisteiden sijainti voidaan siirtää mahdollisimman kauas vaativista olosuhteista. Voi olla kuitenkin tarpeellista miettiä myös olosuhteiden rajoittamista, jos esimerkiksi tuotteen tehoa laske-  
malla saavutetaan merkittävästi parempi tuotteen käyttöluotettavuus.



## 4. YHTEENVETO

Hydraulitiivisteissä korkean lämpötilan ja paineen olosuhteisiin ei ole tapahtunut suuria muutoksia muutamiin vuosiin ja tiivisteiden hajoamismekanismeja tutkitaan edelleen kokeellisesti monien tahojen aloitteesta. Rajattu määrä korkean suorituskyvyn materiaaleja löytyy vaativiin olosuhteisiin. Polymeerien fysikaaliset ominaisuudet rajaavat ne toimimaan alle 300 celsiuksen jatkuvassa käytössä ja tällöinkin lämpötila kiihdyttää merkittävästi tiivisteiden ikääntymistä.

Tässä työssä kävin läpi paljon erilaisia valmistajien tarjoamia materiaaleja hydraulitiivisteisiin ja esittelin joidenkin tieteellisten töiden löydöksiä siitä, mitä tiedämme tiivisteiden käyttäytymisestä. Tiivistemateriaaleilta vaadittavat ominaisuudet kuten elastisuus rajaavat materiaalivalinnat suhteellisen kapeaan joukkoon polymeerejä, koska hydraulitiivisteiden jonkin osan täytyy aina olla elastinen. Korkean lämpötilan ja paineen luomat olosuhte-ehdot rajaavat materiaali-ryhmän kalliisiin erikoistiivistemateriaaleihin, kuten FVMQ, TFE/P, FKM, PEEK, PTFE ja PAI.

Työssä käsittelin myös ratkaisuita tiivisteiden käyttöä parantamiseksi. On tärkeää valita oikea tiivistemateriaali ja -malli sekä voiteluaine. Tukirenkaat auttavat rakotiivistymiseen ja puskuritiivisteet paine- ja lämpötilavaihteluihin. Lisäksi lämmönjohtaminen muualle kuin tiivisteeseen auttaa tiivistettä kestämään. Lopulta tiivisteiden rajalliset materiaaliominaisuudet on huomioitava tiivistesovellusta suunniteltaessa.

## LÄHTEET

- Aalto University, n.d. Luento 2 polymeerien rakenteet.pdf.
- Angerhausen, J., Woyciniuk, M., Murrenhoff, H., Schmitz, K., 2019. Simulation and experimental validation of translational hydraulic seal wear. *Tribol. Int.* 134, 296–307. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.048>
- Bae, J., Chung, K.-H., 2017. Accelerated wear testing of polyurethane hydraulic seal. *Polym. Test.* 63, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.014>
- Chandrasekaran, V.C., 2010. CHAPTER 2 - Rubber Properties for Functional Seal Requirements, in: Chandrasekaran, V.C. (Ed.), *Rubber Seals for Fluid and Hydraulic Systems*. William Andrew Publishing, Oxford, pp. 7–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2075-7.10002-4>
- Chen, X., Tu, F., Gao, F., Cheng, H., Xing, S., 2021. Variable Gap Sealing Technology of a Hydraulic Cylinder Based on Magnetic Shape Memory Alloy. *Coatings* 11, 950. <https://doi.org/10.3390/coatings11080950>
- Compression Set of Elastomeric Materials, 2023. . Stock. Elastomerics. URL <https://www.stockwell.com/compression-set-testing/> (accessed 7.17.23).
- Curbellplastics, 2023. Plastic Material Properties Table | Sort & Compare [WWW Document]. Curbell Plast. URL <https://www.curbellplastics.com/resource-library/material-selection-tools/plastic-properties-table/> (accessed 7.17.23).
- Drakeplastics, 2021. Ultra High-Performance Plastic Materials: Solutions for Your Most Demanding Applications - Drake Plastics. URL <https://drakeplastics.com/high-performance-plastic-materials> (accessed 7.27.23).
- ECHA, 2023. All news - ECHA [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/nl/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal> (accessed 7.17.23).
- Ensingerplastics, 2023a. PEEK plastic material | Ensinger [WWW Document]. URL <https://www.ensingerplastics.com/en/thermoplastic-materials/peek-plastic> (accessed 7.17.23).
- Ensingerplastics, 2023b. PEKEKK - TECAPEEK ST black | Ensinger [WWW Document]. URL <https://www.ensingerplastics.com/en-us/shapes/products/peek-tecapeek-st-black> (accessed 7.17.23).
- Ensingerplastics, 2023c. Acetal POM-H natural - TECAFORM AD natural | Ensinger [WWW Document]. URL <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/acetal-tecaform-ad-natural-> (accessed 5.13.23).
- Gong, R., Wang, H., Zhang, H., Xu, Y., 2019. Influence of wear on hot banding migration of sealing ring using FEM. *Wear* 428–429, 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.013>
- Gough–Joule effect, 2020. . Wikipedia.
- Guan, H., Yang, F., Wang, Q., 2011. Study on evaluation index system of rubber materials for sealing. *Mater. Des.* 32, 2404–2412. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.030>
- Heipl, O., Murrenhoff, H., 2015. Friction of hydraulic rod seals at high velocities. *Tribol. Int.* 85, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.01.002>

- Holopainen, E., 2018. Öljyn online-kunnonvalvontalaitteiston hyödyt TU7:n öljykierrossa. 2018.
- Huang, Y., Salant, R.F., 2016. Simulation of a hydraulic rod seal with a textured rod and starvation. *Tribol. Int.* 95, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.024>
- Impomet, 2023. Silikonit, polyuretaanit, MS polymeerit [WWW Document]. Impomet. URL <https://www.impomet.com/tuotteet/kemikaalit/silikonit-polyuretaanit-ms-polymeerit> (accessed 7.28.23).
- Industrial quick search directory, 2023. Hydraulic seals. *Hydraul. Seals.* URL <https://www.iqsdirectory.com/articles/hydraulic-seal.html> (accessed 3.10.23).
- Kim, H., Kim, R.-U., Chung, K.-H., An, J.-H., Jeon, H.-G., Kim, B.-J., 2014. Effect of test parameters on degradation of polyurethane elastomer for accelerated life testing. *Polym. Test.* 40, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.08.004>
- Mahankar, P.S., Dhoble, A.S., 2021. Review of hydraulic seal failures due to effect of medium to high temperature. *Eng. Fail. Anal.* 127. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105552>
- Makeitfrom, 2021. Thermoplastics :: MakeItFrom.com [WWW Document]. URL <https://www.makeitfrom.com/material-group/Thermoplastic> (accessed 7.17.23).
- Massey, L.K., 2003. Polyoxymethylene (Acetal) 2003.
- Materiaalien kemia: POLYMEERIT, 2017. . hiukkan. URL <https://hiukkan.wordpress.com/2017/12/15/materiaalien-kemia-polymeerit/> (accessed 7.17.23).
- McMaster-Carr [WWW Document], 2023. URL <https://www.mcmaster.com/> (accessed 7.28.23).
- Millholland, C.D., 2016. Polymer Profiles: A Guide to the World's Most Widely Used Plastics [WWW Document]. *Adv. Mater.* URL <https://www.thermofisher.com/blog/materials/polymer-profiles-a-guide-to-the-worlds-most-widely-used-plastics/> (accessed 7.17.23).
- Mohammed, M.H., Banks, W.M., Hayward, D., Liggat, J.J., Pethrick, R.A., Thomson, B., 2013. Physical properties of poly(ether ether ketone) exposed to simulated severe oilfield service conditions. *Polym. Degrad. Stab.* 98, 1264–1270. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.014>
- M-seals, 2023. Tetrafluoroethylene propylene (TFE/P, FEPM, Aflas™) [WWW Document]. URL <https://www.m-seals.com/uk/en/download-center/data-sheets-and-msds/datasheets-for-machined-seals/tetrafluoroethylene-propylene-tfe-p-fepm-aflas/> (accessed 6.2.23).
- Muller, H.K., 1998. *Fluid Sealing Technology: Principles and Applications.* Routledge.
- Muovien luokitus [WWW Document], 2023. . Muoviteollisuus Ry. URL [https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien\\_luokitus/](https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_luokitus/) (accessed 7.17.23).
- Muoviteollisuus ry, 2023. Muovisanastoa [WWW Document]. Muoviteollisuus Ry. URL <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/> (accessed 7.17.23).
- Nikas, G., 2018. Parametric and Optimization Study of Rectangular-Rounded, Hydraulic, Elastomeric, Reciprocating Seals at Temperatures between –54 and +135 °C. *Lubricants* 6, 77. <https://doi.org/10.3390/lubricants6030077>
- Nikas, G., 2008. Research on the tribology of hydraulic reciprocating seals. pp. 11–56.
- Nikas, G.K., 2010. Eighty years of research on hydraulic reciprocating seals: Review of tribological studies and related topics since the 1930s. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.* 224, 1–23. <https://doi.org/10.1243/13506501JET607>

- Nitrile / NBR | O-Ring [WWW Document], 2023. URL [//o-ring.info/en/materials/nitrile--nbr/](https://o-ring.info/en/materials/nitrile--nbr/) (accessed 5.17.23).
- O-ring Degradation: Characteristics, Causes and Solutions [WWW Document], 2022. URL <https://eriks.com/en/know-how-hub/blogs/o-ring-degradation-characteristics-causes-solutions.html> (accessed 7.26.23).
- Osa 11 – termoplastiset elastomeerit – Muoviyhdistys ry – muovieto ja kontakteja, 2016. URL <https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/19/osa-11-termoplastiset-elastomeerit/> (accessed 7.17.23).
- Parker katalogi, 2011. Catalog\_PTFE-Seals\_PDE3354-GB\_1103.pdf.
- PbiAM, 2023. TPI | 6000 series | PBI Advanced Materials Co.,Ltd. URL <https://www.pbi-am.com/en/base-polymers/tpi-2> (accessed 7.17.23).
- Peng, C., Ouyang, X., Guo, S., Zhou, Q., Yang, H., 2020. Numerical analysis of the traction effect on reciprocating seals in the hydraulic actuator. *Tribol. Int.* 143, 105966. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105966>
- Pinedo, B., Hadfield, M., Tzanakis, I., Conte, M., Anand, M., 2018. Thermal analysis and tribological investigation on TPU and NBR elastomers applied to sealing applications. *Tribol. Int.* 127, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.05.032>
- Polyeetteri-imidi (PEI), 2023. URL <https://polymerik.fi/polyeetteri-imidi/> (accessed 7.17.23).
- Polymerdatabase, 2023. Stress-Strain Behavior of Polymers [WWW Document]. URL <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Stress-Strain%20Behavior.html> (accessed 7.24.23).
- Rinnbauer, M., 2014. Elastomers and Their Properties, in: Mang, T. (Ed.), *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 475–477. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2\\_345](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_345)
- Sealing Australia, 2014. O’rings – Sealing Australia. URL <https://sealingaustralia.com.au/orings/> (accessed 6.4.23).
- Shen, M., Peng, X., Meng, X., Zheng, J., Zhu, M., 2016. Fretting wear behavior of acrylonitrile–butadiene rubber (NBR) for mechanical seal applications. *Tribol. Int.* 93, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.029>
- SKF katalogi, 2014. Hydraulic seals catalogue.
- Solvay, 2023. Torlon® PAI [WWW Document]. URL <https://www.solvay.com/en/brands/torlon-pai> (accessed 7.17.23).
- Techne, 2023. VMQ - Silicone [WWW Document]. Techné Group. URL <https://www.techne.fr/uk/expertise/materials/vmq> (accessed 7.31.23).
- Techne, 2014. Focus on Materials : Elastomers & Thermoplastics [WWW Document]. Techné Group. URL <https://www.techne.fr/uk/expertise/materials> (accessed 7.31.23).
- Trelleborg, 2022. hydraulic\_complete\_gb\_en.pdf [WWW Document]. URL [https://www.trelleborg.com/-/media/tss-media-repository/tss\\_website/pdf-and-other-literature/catalogs/hydraulic\\_complete\\_gb\\_en.pdf?rev=d39eea956a4c4e40bdf1bba5c2e203fc&openpdf=1](https://www.trelleborg.com/-/media/tss-media-repository/tss_website/pdf-and-other-literature/catalogs/hydraulic_complete_gb_en.pdf?rev=d39eea956a4c4e40bdf1bba5c2e203fc&openpdf=1) (accessed 6.21.23).
- Wang, B., Meng, X., Peng, X., Chen, Y., 2021. Experimental investigations on the effect of rod surface roughness on lubrication characteristics of a hydraulic O-ring seal. *Tribol. Int.* 156, 106791. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106791>
- Wang, B., Peng, X., Meng, X., 2019. A thermo-elastohydrodynamic lubrication model for hydraulic rod O-ring seals under mixed lubrication conditions. *Tribol. Int.* 129, 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.044>

- What is a Mechanical seal? [WWW Document], 2015. URL <https://www.aesseal.com/en/resources/academy/what-is-a-mechanical-seal> (accessed 5.16.23).
- Xiang, C., Guo, F., Jia, X., Wang, Y., Huang, X., 2019. Thermo-elastohydrodynamic mixed-lubrication model for reciprocating rod seals. *Tribol. Int.* 140, 105894. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105894>
- Zhao, X., Appiah, E., Xia, Y., Wang, J., 2022. Degradation process analysis and reliability prediction modeling of hydraulic reciprocating seal based on monitoring data. *Eng. Fail. Anal.* 140, 106565. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106565>