



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KITKAHÄVIÖ POLTTOMOOTORISSA

Joni Piiponniemi

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2017

TIIVISTELMÄ

Kitkahäviö polttomoottorissa

Joni Piiponniemi

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2017, 32 s. + 0 liitettä

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Tapio Korpela

Polttomoottori on yhä edelleen yksi tärkeimmistä energialähteistä, etenkin henkilö- ja tavaraliikenteessä. Viime vuosikymmenien aikana huoli ympäristöstä on asettanut polttomoottoreille kovia tavoitteita päästöjen suhteen, ja vaihtoehtoisia energialähteitä on alettu kehittämään. Vaikka polttomoottori on selvästi käytetyin moottorityyppi auto- ja kuljetusalalla, on sen puutteet huomattavat. Noin kolmasosa polttomoottorin polttoaineesta kuluu sen itse tuottaman kitkan voittamiseen; tätä kutsutaan kitkahäviöksi. Työn tarkoitus on esittää polttomoottorissa esiintyviä yksittäisiä komponentteja ja ilmiöitä, jotka yhdessä muodostavat tämän suhteellisen suuren kokonaiskitkahäviön. Pääpaino työssä on mäntäkokoospanossa, joka muodostui selkeästi merkittävimmäksi ja sitä myöten myös tutkituimmaksi kohteeksi aiheen saralla. Lisäksi työssä on esitetty tutkittuja, tai jo käytössä olevia menetelmiä kitkavoimien vähentämiseksi komponenteissa. Tavoitteena on luoda tiivis paketti tärkeimmistä kitkahäviötä aiheuttavista kohteista polttomoottorissa helposti ymmärrettävään muotoon.

Työ on kirjallisuuskatsaus alan kirjallisuuteen ja tutkimuksiin. Työssä on käytetty apuna useita tietokantoja ja niiden sisältämiä artikkeleita, kirjoja ja tutkimuksia. Lisäksi kirjoittajalla on omakohtaista kokemusta monenlaisista polttomoottoreista, niiden huoltamisesta ja korjaamisesta ja tätä tietoa on käytetty työssä moottorin yleisten toimintaperiaatteiden selventämiseen. Työn tärkeimmät tulokset ovat mäntäkokoospanon suuri merkitys kitkahäviön tuottamisessa ja yleinen katsaus polttomoottorin kitkatekijöihin. Työssä on jouduttu yleistämään paljon asioita, sillä massiivinen erityyppisten polttomoottorien lukumäärä pakotti tekemään työstä pintakatsauksen, joka huomioi vain yleisimmät moottorin komponenttityypit.

Asiasanat: Polttomoottori, kitka, kitkahäviö

ABSTRACT

Friction loss in internal combustion engine

Joni Piipponiemi

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2017, 32 p. + 0 Appendixes

Supervisor(s) at the university: Tapio Korpela

Internal combustion engine is still one of the most important energy sources, especially in passenger and freight traffic. During last decades, the worry about environment has set strict restrictions for internal combustion engines and some alternative energy sources has been developed. Despite the fact, the ICE (internal combustion engine) is the most used engine type in cars and trucks, it has many disadvantages in effectiveness. About third of the fuel consumes to engine's own friction losses. The aim of this thesis is to present individual components and phenomenon of ICE which form this relatively large overall friction loss. The major subject is piston assembly which proved to be the most significant and in that way to most researched subject in the subject area. The goal is to create a compact and accessible package about most important friction losses causing ICE components.

The work is a literature review to field's literature and researches. In the thesis has been used several databases including articles, books, and researches. The writer has his own practical experience about engines and he has used his knowledge to explain the basic principles of ICE. The most important results of the thesis are the significant friction loss of piston assembly and a general overview to friction loss in components. There are several generalizations about engines in thesis due to huge amount of different engine types manufactured. This thesis serves as general guide to power losses in the most common engine component types.

Keywords: Internal combustion engine, friction, friction loss

ALKUSANAT

Tämän kandidaatintyön tarkoitus on ennen kaikkea sivistää itseäni tässä kiinnostavassa aiheessa ja tuottaa uuden opin myötä katsaus polttomoottoreiden kitkahäviöihin. Tarkoitukseni on, että tämä työ tarjoaa myös mahdollisuuden muille kiinnostuneille sukeltaa polttomoottorin syvyyksiin tutkimaan kitkahäviöitä ja niiden perimmäisiä syitä. Täytyy muistaa, että kitkahäviötä on paljon muuallakin kuin polttomoottorin uumenissa ja yhden tieteenalan tutkimukset ovat vain portti käyttää opittuja tietoja muiden alojen sovellutuksiin.

Osoitan kiitokseni työn ohjaajalle Tapio Korpelalle, joka innosti sanoillaan ottamaan tämän työn aiheeksi, vaikka itseäni vielä aiheen haastavuus alussa hirvittikin. Kiitän myös vaimoani Reetaa, joka jaksoi pitää minusta huolta tämänkin projektin ajan.

Oulu, 20.09.2017

Joni Piiponniemi

Joni Piiponniemi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO.....	7
2 TRIBOLOGIA	8
2.1 Kitka	
2.1.1 Klassiset kitkalait	8
2.1.2 Adhesiivinen kitka.....	9
2.2 Voitelu	10
2.2.1 Voitelumekanismit	12
3 KITKATEKIJÄT	14
3.1 Mäntäkoonpano	14
3.1.1 Männänrenkaat	15
3.1.1.1 Männänrenkaiden voitelu.....	20
3.1.2 Männän helma	22
3.1.3 Männäntappi.....	25
3.1.4 Kiertokangen/kampiakselin laakeri.....	26
3.2 Venttiilikoneisto	27
4 KITKAN REDUSOINTI.....	30
5 YHTEENVETO	32
6 LÄHDELUETTELO	34

MERKINNÄT JA LYHENTEET

F	voima
F_{μ}	kitkavoima
h	korkeus
p	paine
u	nopeus
x	pituus
μ	viskositeetti
μ_k	kitkakerroin
ρ	tiheys

1 JOHDANTO

Työn aiheena on polttomoottorissa muodostuvat kitkahäviöt. Aihe on valittu sen ajankohtaisuuden ja mielenkiintoisuuden vuoksi. Alkuisäyksen työn aiheeseen sai jo vuosia sitten julkaistu Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n artikkeli (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 2012), jossa todettiin kolmasosan henkilöauton polttoaineesta kuluvan kitkan voittamiseen. Pienellä tutkimuksella löytyi useita eri tutkimuksia kyseiseen aiheeseen liittyen, tarpeeksi kandidaatintyötä varten.

Työn tarkoitus on tehdä selonteko polttomoottorissa toimivien komponenttien kitkahäviön syistä ja hieman avata erilaisia mahdollisuuksia kitkan vähentämiseksi. Polttomoottori on käsitteenä erittäin laaja erilaisia malleja ollessa lukematon määrä. Työ on rajattu hyvin perustavaa laatua oleviin moottorin osiin, joita voi löytää esimerkiksi nykypäivän henkilöautoista. Aihetta on tutkittu laajalti varsinkin henkilöautojen osalta niiden ollessa suurin polttomoottorien kuluttaja maailmassa. Ympäristöasiat puhuttavat ihmisiä koko ajan enemmän ja siksi tämäkin aihe on noussut ajankohtaiseksi. Autojen päästöjä pyritään hillitsemään jatkuvasti ja näin ollen myös kitkahäviöitä pyritään hillitsemään.

Tämän työn lopputuloksena on katsaus kitkahäviöihin, jossa keskeisimmät komponentit ja niiden kitkahäviöt on pyritty esittämään selkeästi, mutta tarkasti. Työn alussa on esitetty perusteita tribologiasta, joka kuuluu erottamattomasti kitkatekijöiden tutkintaan ja auttaa varsinaisen aiheen ymmärtämistä.

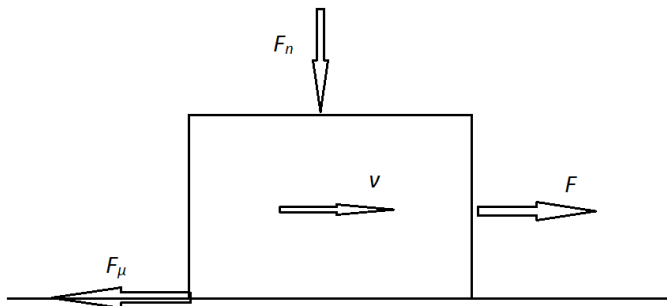
2 TRIBOLOGIA

Tribologia on tieteenala, joka tutkii pintoja, joilla on toisiinsa nähden liikettä ja vuorovaikutusta. Vuorovaikutus määritellään pintojen väliseksi kemiallisiksi ja fysikaalisiksi reaktioiksi ja ominaisuuksiksi, jotka liittyvät lähinnä kitkan, kulumisen ja voiteluun muodostamaan systeemiin. (Kivioja, Kivivuori, & Salonen, 2001)

Aiheeseen sopien kandidaatintyössä tullaan esittelemään tribologian perusteita. Varsinkin voiteluun liittyvät alan tutkimukset ovat merkittäviä, sillä polttomoottorista löytyy harvoja kitkatekijöitä, joissa hankaavien pintojen välillä ei ole voiteluaineesta muodostuvaa kalvoa.

2.1 Kitka

2.1.1 Klassiset kitkalait



Kuva 1 Liukuvien kappaleiden välissä vaikuttava kitkavoima

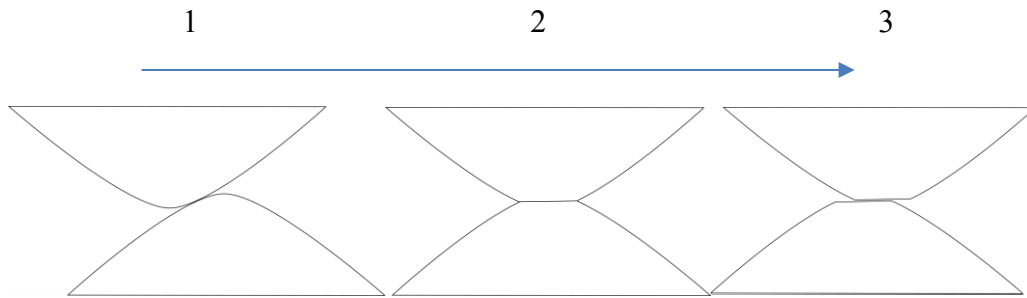
Kitkalla käsitetään yleisesti kuvassa 1 esitettyä kitkavoimaa F_{μ} . Tällaista tapausta käytettäessä puhutaan klassisista kitkalaeista, jotka kuuluvat:

1. Kitka ei riipu näennäisestä kosketusalasta
2. Kitkavoima on suoraan verrannollinen kosketusvoimaan
3. Liikekitka ei riipu liukunopeudesta
4. Lepokitka on suurempi kuin liukukitka (vain toisinaan esitetty lakina)

Lait 1. ja 2. ovat yleispäteviä ja pitävät paikkaansa lukuisissa tapauksissa lain 3. taas sijoittuessa harvempiin tapauksiin. (Kivioja et al., 2001)

2.1.2 Adhesiivinen kitka

Kitkaa voidaan ilmiönä tarkastella tarkemmin adhesiivisen kitkateorian avulla. Tämä kitkateoria tukee myös 1. kitkalain toteamusta, jossa todetaan näennäisen kosketusalan olevan vain osa todellisesta kosketusvoimasta.



Kuva 2 Adhesiivisen kitkan vaiheet

Kuva 2 esittää sivusta otettua leikkausta kahdesta pinnasta, jotka ovat näennäisesti tasaisia. Kuitenkin mikrotasolla voidaan huomata eroavaisuuksia pinnanlaadun suhteen. Tässä tapauksessa tarkkaa kitkavoiman määrää ei voida määrittää käyttämällä kappaleen kokonaispinta-alaa, vaan ainoastaan pintoja, jotka todellisuudessa koskevat/leikkaavat toisiaan.

Adhesiivisen kitkan vaiheet:

1. Kappaleen karhennukset liukuvat toisiaan vasten ja toisiinsa osuessaan aiheuttavat sekä elastista, että plastista muodonmuutosta. Lisäksi saattaa tapahtua nk. kyntämistä, jossa ei synny liitosta, vaan toinen uloke muokkaa toiseen uran
2. Varsinainen adhesiivinen liitos. Pinnat leikkaavat muodostaen liitoksen.
3. Liitoksen murtamiseen tarvittavan voiman kohdistuessa kappaleeseen liitos repeää ja vaiheessa 1 muodostunut elastinen muodonmuutos palautuu.

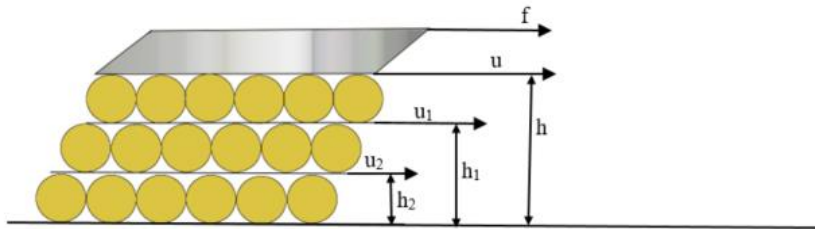
Yksinkertainen adhesiivinen kitkateorian mukaan toisiaan vasten puristuvien pintojen välille syntyy adhesiivisia liitoksia kohtiin, jossa pinnan karheudesta johtuvat ulokkeet leikkaavat toisiinsa kiinni. Näiden liitosten murtamiseen tarvittava voima on osa kitkavoimasta. (Kivioja et al., 2001)

2.2 Voitelu

Polttomoottorin ja kaikkien yleisesti toisiaan vasten liikkuvien osien kulumiseen ja kitkaan yksi olennaisimmista vaikuttavista tekijöistä on osien välinen voitelu, sillä yksinkertaisuudessaan voitelun syvin tehtävä on kontrolloida kitkaa ja kulumista annetussa systeemissä. Voiteluaineen ominaisuuksia tutkitaankin lähinnä tutkimalla sen vaikutusta kulumis- ja kitkatoimintaan. Nykyiset voiteluaineet perustuvat lähinnä tutkimukseen ja öljyn ominaisuuksien huonontumisen tarkkailuun ja estämiseen, sillä öljyn käyttöikä on muodostunut yhtä tärkeäksi, kuin sen voiteluteho (Stachowiak & Batchelor, 2014).

Voiteluaineilla on lukemattomia mitattavissa olevia ominaisuuksia liittyen lämpötiloihin, jännityksiin, lisäaineiden ja kaasujen osuuksiin voiteluaineessa, joista on esitetty enemmän esimerkiksi *Engineering Tribology*- kirjassa (Stachowiak & Batchelor, 2014), mutta alla on esitetty kyseisestä lähteestä tämän työn kannalta oleellimmat asiat, eli öljyn viskositeetin merkitys ja polttomoottorissa ilmenevät eri voitelumuodot, joihin on myöhemmin viitattu.

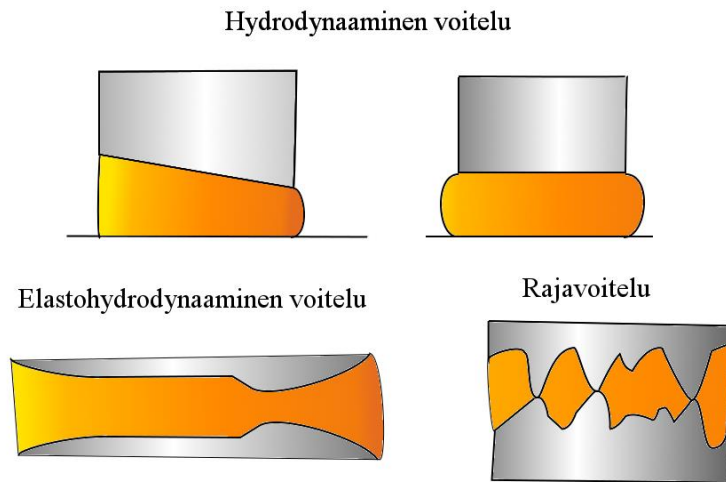
Polttomoottorin voitelun suurin yksittäinen tekijä on öljyn viskositeetti. Viskositeetti on ominaisuus, joka on eri erilaisilla öljyillä, mutta vaihtelee ympäristön vaikutuksesta suuresti. Tekijöitä, jotka vaikuttavat öljyn viskositeettiin ovat: lämpötila, leikkausnopeus, paine ja luodun voitelukalvon paksuus. Näistä tärkein on lämpötila, sillä sopiva öljyn viskositeetti valitaan yleisesti toimimaan optimaalisesti tietyssä lämpötilassa. Näin ollen, ympäristön odotettavissa olevan lämpötilan tietäminen on elintärkeää oikeanlaisen voitelukalvon muodostumiseksi. Lämpötilan noustessa öljyn viskositeetti putoaa nopeasti. Joissain tapauksissa viskositeetti voi pudota n. 80% lämpötilan noustessa 25° (Stachowiak & Batchelor, 2014).



Kuva 3 Voiteluaineen rakenne Newtonin mukaan (Kivioja et al., 2001) mukailten

Viskositeetti tarkoittaa voiteluaineen pyrkimystä vastustaa liikettä sisäisten kitkojen avulla. Käytännössä viskositeetin pystyy näkemään voiteluaineen ”notkeudesta” esimerkiksi korkeamman viskositeetin omaavan öljyn virtaa hitaammin kuin matalan viskositeetin vesi. Nesteet voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan niiden viskoosikäyttäytymisen perusteella: newtonilaisiin ja ei-newtonilaisiin nesteisiin, tai voiteluaineisiin. Ylempänä esitetyssä kuvassa (Kuva 3) on esitetty malli newtonilaisesti käyttäytyville voiteluaineille. Peruseriaate on, että nesteen viskositeetti säilyy vakiona ja riippumattomana leikkausjännityksestä ja leikkausnopeudesta. Kuvassa ylin molekyylikerros liikkuu vastapinnan nopeudella u alimman kerroksen pysyessä paikoillaan liikkumaton pintaa vasten. Kukin kerros niiden välillä kulkee omaa nopeuttaan u_i korkeudella h_i . Ei-newtonilaiset voiteluaineet poikkeavat newtonilaisista sillä, että niiden viskositeetti on leikkausnopeudesta riippuva. Tyypillisesti tällaisia aineita ovat mm. vesi-öljy-emulsiot ja polymeereillä seostetut öljyt ja rasvat (Kivioja et al., 2001).

2.2.1 Voitelumekanismit



Kuva 4 Polttomoottorin tyypillisimmät voitelumekanismit

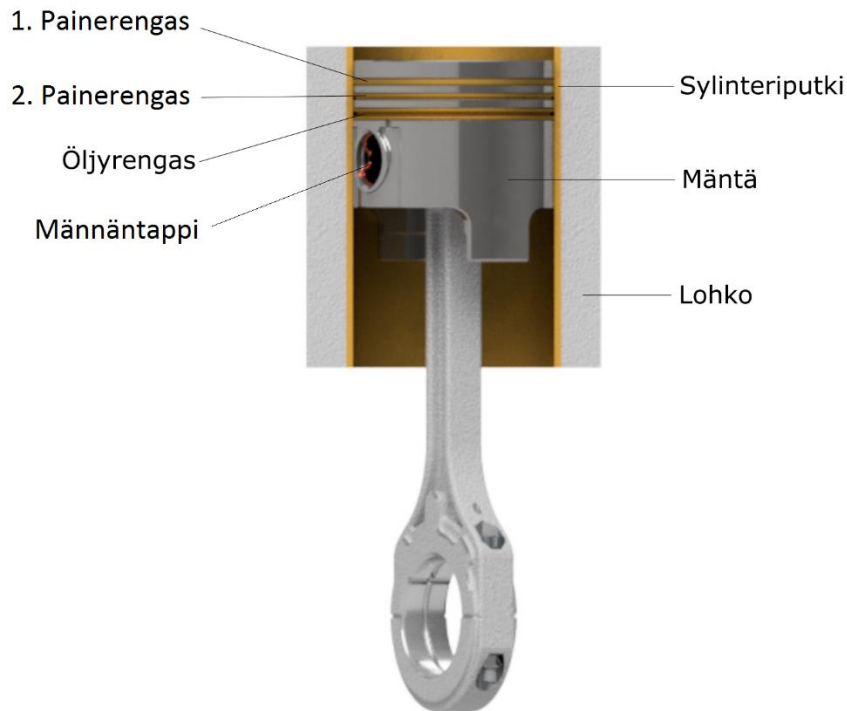
Polttomoottorin muuttuvien olosuhteiden vuoksi syntyy erilaisia voitelumekanismeja. Kuva 4 on esitettyä tyypillisimmät mekanismit, joita polttomoottorissa ilmenee (Wong & Tung, 2016). Nestevoitelumekanismit, joissa voitelukalvo pystyy erottamaan koneenosat toisistaan kokonaan, voidaan jakaa kolmeen osaan: Hydrodynaaminen voitelu, elastohydrodynaaminen voitelu ja hydrostaattinen voitelu. Näistä kaksi ensimmäistä on tyypillisiä polttomoottorissa.

Hydrodynaaminen voitelu perustuu voiteluaineen puristumiseen pintojen väliin joko kulkeutumalla kiilamaiseen rakkoon, jonka rajapinnat liikkuvat tangentialisesti toisiinsa nähden, tai pintojen puristuessa toisiaan kohti, jolloin voiteluaine pusertuu ulos reunoilta (Kivioja et al., 2001). Elastohydrodynaamisessa voitelua syntyy useasti viivamaisissa, tai pistemäisissä kontakteissa kuormituksen ollessa huomattavan suuri. Tätä voitelumekanismia voisi ajatella hydrodynaamisena voiteluna, jossa vastinpinnat kokevat muodonmuutoksen ja voiteluaineen viskositeetti kasvaa suuren paineen alla. Hydrodynaamiselle voitelulle ominainen voiteluaineen pusertuminen on myös vähäisempää (Stachowiak & Batchelor, 2014). Hydrostaattisella voitelulla erillisen voitelupumpun tuottama voiteluaineen paine pitää pinnat erillään toisistaan, mutta kuten todettu, tällaista systeemiä ei usein tapaa tavallisimmissa polttomoottorirakenteissa.

Kosketusvoiteluissa toisiaan nähden liikkeessä olevilla pinoilla on kontakti toisiinsa. Rajavoitelu on kosketusvoitelumuoto, jossa pintojen huiput ovat niin lähellä toisiaan, että ne kantavat suurimman osan kuormasta. Pintojen väliin ei vielä muodostu metallien välistä kontaktia, sillä liukupinnoilla on edelleenkin hyvin ohut voitelukerros. Voitelukalvon muodostumismekanismi voi olla fysikaalinen, tai kemiallinen absorptio, tai kemiallinen reaktio (Kivioja et al., 2001). Normaalisti toimivassa polttomoottorissa tämän tulisi olla ainoa metallien välinen kosketusvoitelumuoto, eikä kahden metallin välistä suoraa kontaktia tulisi olla, kun tarkastellaan osien muodostamaa kitkaa ja niiden kulumista.

Sekavoiteluksi kutsutaan voitelumekanismia, jolla on nimensä mukaisesti ominaisuuksia nestevoitelumekanismilta ja kosketusvoitelumekanismilta. Yleensä se toimii välivaiheena olosuhteiden muuttuessa ja voitelun siirtymisestä mekaniemista toiseen.

3 KITKATEKIJÄT



Kuva 5 Polttomoottorin mäntäkokoontapano

3.1 Mäntäkokoontapano

Mäntäkokoontapano sisältää tyypillisesti männän, männänrenkaat, männäntapin, kiertokangen ja laakerin. Osien toiminta voidaan luokitella kolmeen kitkahäviöllisesti ja voitelun kannalta merkittävään ryhmään:

1. Männänrenkaiden edestakainen liike sylinteriputkea vasten
2. Männän helman liike sylinteriputkea vasten
3. Laakeripintojen pyörimisliike männäntapissa ja kiertokangessa

Suurin osa kitkahäviöstä tulee sylinteriputken vuorovaikutuksesta männänrenkaisiin ja männän helmaan (Wong & Tung, 2016).

Mäntä liikkuu sylinterin sisällä männän yläpuolella tapahtuvan ilma-polttoaine-seoksen palamisesta aiheutuvan paineaallon johdosta. Mäntä on yhdistetty tyypillisesti kiertokankeen männäntapilla, joka mahdollistaa liike-energian välittymisen kiertokangelle. Männälle tyypillisesti soveltuvin materiaali on Al-Si-seos perustuen keveyteen ja muokattavuuteen. Joissakin harvinaisemmissa tapauksissa on käytetty myös teräksisiä mäntiä, jotka kuitenkin vaativat tarkempia laskelmia jäähtyksen kannalta. Vaikka mäntä toimiikin ”seinänä” palotilan ja kampikammion välissä, ei ole tarkoituksenmukaista tehdä männän ja sylinteriputken sovitteesta liian tiivistä. Kitkan minimoimisen kannalta optimaalisin tilanne olisi se, että mäntä itsessään ei osuisi sylinteriputkeen lainkaan, mutta käytännössä tämän toteuttaminen on lähestulkoon mahdotonta (Dietsche & Dietsche, 2011). Mäntäkokoontalon on todettu aiheuttavan jopa noin 50%-75% osuus moottorin kaikesta kitkahäviöstä (Söderfjäll, Herbst, Larsson, & Almqvist, 2017; Wong & Tung, 2016).

3.1.1 Männänrenkaat



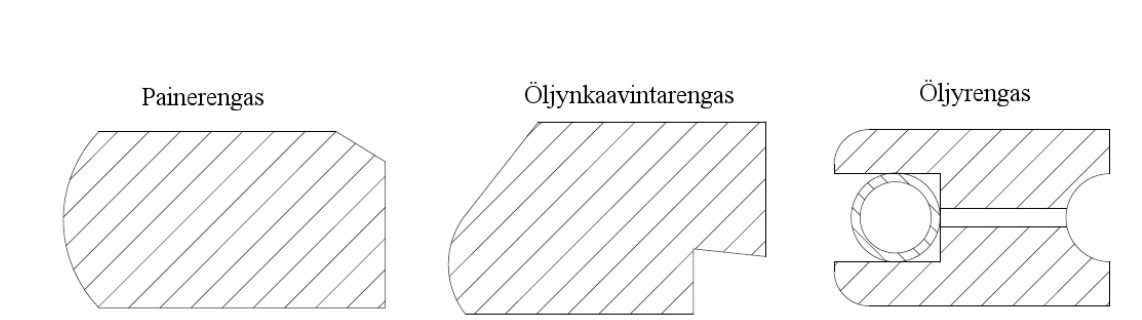
Kuva 6 Männänrenkaat ja niiden urat

Männänrenkaita pidetään suurimpana yksittäisenä kitkahäviön aiheuttajana polttomoottorissa. On tutkittu, että mäntäkokoontalon kitkahäviöosuudesta noin puolet tulee suoraan männänrenkaiden ja sylinteriputken vuorovaikutuksesta (Söderfjäll et al., 2017).

Männänrenkaiden tarkoitus on eristää palotilan paine kampikammioista, jakaa ja kontrolloida voiteluöljyä, siirtää lämpöä männästä lohkokoon ja stabiloida männän liike sylinteriputken sisällä. Tiivisteinä männänrenkaat toimii labyrintti-tiivisteiden tavoin; se ei suoranaisesti muodosta läpipääsemätöntä estettä kaasulle vaan kaasut kiertävät renkaan

männän puolelle jäävän reitin kautta, joka kuitenkin on niin ahdas, että se käytännössä estää kaasun kulun. Männänrenkaat ovat tyypillisesti avoimia yhdestä kohtaa mahdollistaen helpomman asennuksen ja puristamattomana ollessaan suuremman halkaisijan kuin sylinteriputkella on, mikä puolestaan mahdollistaa männänrenkaan esijännityksen. Männänrengaspakettiin kuuluu tyypillisesti 2-5 rengasta, tyypeittäin lukumäärät vaihtelevat 2-4 painerenkasta ja 0-3 öljyrenkasta. Lisäksi voidaan käyttää nk. öljynkaavintarengasta painerenkaan ja öljyrenkaan välissä.(Jaana Tamminen & Carl-Erik Sandström, 2002)

Kuva 6 on esitetty kolmen männänrenkaan kokoonpano. Ylimmäistä rengasta kutsutaan painerenkaaksi, sillä sen pääasiallinen tehtävä on eristää männänlaen yläpuolella oleva palotila männän alla olevasta kampikammioista. Palamistilanteessa syntyvät kaasut tunkeutuvat painerenkaan ja männänväliin painaen renkaan sylinteriputkea vasten. Vaikutus voimistuu ylimmällä renkaalla, sillä siihen osuva paine on voimakkain (Mishra, 2015). Alimmainen rengas puolestaan on öljyrenkas, joka mahdollistaa ylimääräisen öljyn kaavinnan männän kautta takaisin kampikammioon. Öljyrenkaan läpi kulkee aukkoja koko kehän ympäri, joista öljyn kulku tapahtuu (Jaana Tamminen & Carl-Erik Sandström, 2002). Keskimmäinen rengas tunnetaan öljynkaavintarengas, vaikka ylimääräisen öljyn sylinteriputkelta kaapimisen lisäksi sen tehtävänä on tiivistämällä estää palamistilanteessa syntyvien ohivuotokaasujen pääsy kampikammioon.



Kuva 7 Männänrenkaiden poikkileikkaukset (Mishra 2015) mukailten

Männänrenkaiden eri toiminnoista johtuen niiden muodot poikkeavat toisistaan hyvin paljon, kuten Kuva 7 osoitetaan. Siksi puhuttaessa männänrenkaiden ja sylinteriputken välisestä kitkavoimista tulee ottaa huomioon jokaisen renkaan eri käyttäytymismallit

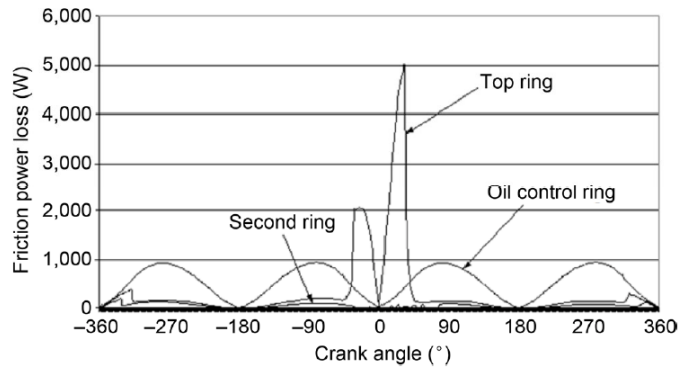
koneen käydessä. Kitkahäviön kannalta oleelliset männänrenkaat ovat painerenkas ja öljynkaavintarenkas, sillä ne ovat suoranaisemmin kontaktissa sylinteriputkeen öljyrenkaaseen verrattuna. Männänrenkaiden dynamiikan analysoiminen on hyvin monimutkaista niissä ja niiden ympärillä nopeasti tapahtuvien muutosten johdosta. Männän primääri ja sekundaariliike tulisi ottaa huomioon tarkasteluissa, sillä luonnollisesti molemmilla on merkittävä vaikutus renkaiden toimintaan. (Mishra, 2015)

Painerenkaan on arvioitu muodostavan 80% männänrenkaiden kitkahäviöstä (Mishra, 2015) ja jopa 5% hukkaenergiaa kaikesta polttoaineesta saadusta kokonaisenergiasta (Morris, Rahmani, Rahnejat, King, & Fitzsimons, 2013). Painerenkaan kitkahäviöllisestä merkityksestä johtuen sen toimintaa on tutkittu paljon. Tutkittuja, ja kitkahäviöön vaikuttavia osatekijöitä ovat renkaan termo-elastohydrodynaamiset ominaisuudet, korkean painealueen tribodynaamiset ominaisuudet, voitelukalvon puristuminen männänrenkaan ja sylinteriputken väliin ja pintojen tekstuuriin vaikutus voiteluun (Mishra, 2015). Lisäksi on huomioitava sylinteriputken muoto, joka ei koskaan ole ideaalisesti pyöreä (Jaana Tamminen & Carl-Erik Sandström, 2002). Öljyrenkaan vaikutus kitkahäviöön on sekundaarinen verrattuna painerenkaan aiheuttamaan korkeisiin kitka-arvoihin. Toisin kuin muilla renkailla, öljyrenkaan kitka ei muodostu kontaktista sylinteriputkeen, vaan sen kitkaan vaikuttavat tekijät ovat öljyn viskositeetti, tangentialiset voimat ja nopeus. Tämän renkaan kitkahäviön tutkimus on hankala järjestää öljyrenkaan erityisestä luonteesta johtuen. (Söderfjäll et al., 2017)

Männänrenkaiden ja sylinteriputken välinen voitelukalvo muuttuu koko ajan; suurimmaksi osaksi voitelun olosuhteet ovat hydrodynaamisia, mutta muuttuu useassa tapauksessa sekavoiteluksi palotilan korkean paineen vuoksi. Männän ylä- ja alakuolonkohdissa voitelu saattaa muuttua rajavoiteluksi männän nopeiden suunnanmuutoksien johdosta. (Mishra, 2015)

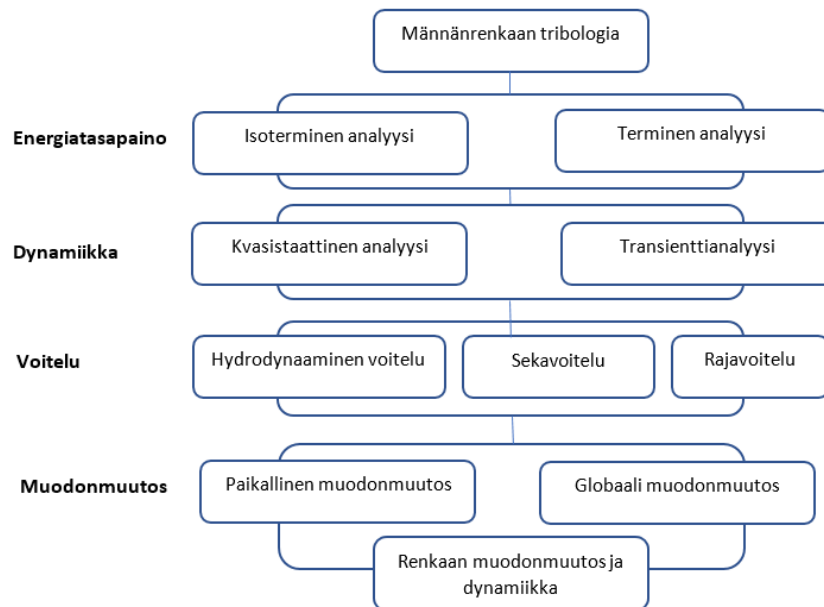
Eri männänrenkaiden aiheuttama kitkahäviö on esitetty Kuva 8 suhteutettuna kampiakselin kulmaan. Diagrammista voidaan nähdä kahden tyyppisiä kitkapiikkejä: Öljyrenkaan aiheuttama puolen tahdin välein tuleva piikki, joka toistuu männän liikkeen ollessa suurimmillaan vaikeuttaen öljyrenkaan toimintaa keräten ylimääräisen öljyputkijan renkaan eteen; sekä ylimmän painerenkaan suunnanvaihdoksen aiheuttaman

piikin, jossa voitelun muutos aiheuttaa kitkahäviötä. Tarkemmassa tarkastelussa käy ilmi painerenkaan kitkahäviön olevan lähes yhtä suuri kuin metalli-metalli-vuorovaikutuksessa (Wong & Tung, 2016).



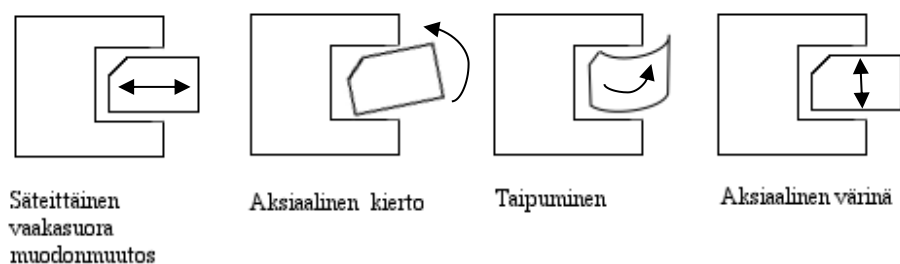
Kuva 8 Männänrenkaiden kitkahäviö suhteessa kampiakselin kulmaan(Wong & Tung, 2016)

Alla on esitettyä Kuva 9 selventämään, kuinka useat fysikaaliset tekijät vaikuttavat männänrenkaiden toimintaan ja toiminnasta aiheutuvaan kitkaan. Tämä kaavio on männänrenkaiden ja sylinteriputken välistä kontaktia kuvaava malli, joka esittää yhteenvetona renkaan rakenteellisen dynamiikan, nestemäisten rakenteiden vuorovaikutuksen siirtymätilassa, karkeapintaisen pinnan vaikutuksen voitelun suorituskykyyn ja hetkellisen elastohydrodynamiikan.(Mishra, 2015)



Kuva 9 Männänrenkassarjaan vaikuttavat tribologiset ominaisuudet (Mishra, 2015) mukailten

Kuva 10 esitetty männänrenkaassa tapahtuva muodonmuutos on merkittävä osa renkaan käyttäytymistä kitkan muodostumisen kannalta. Muodon muuttuessa vähänkin alkutilasta, jossa männänrenkaan ulkosivu on sylinteriputken suuntainen rengas alkaa nopeasti kuluttaa voitelukalvoa ja metallien välinen kontakti on mahdollinen.



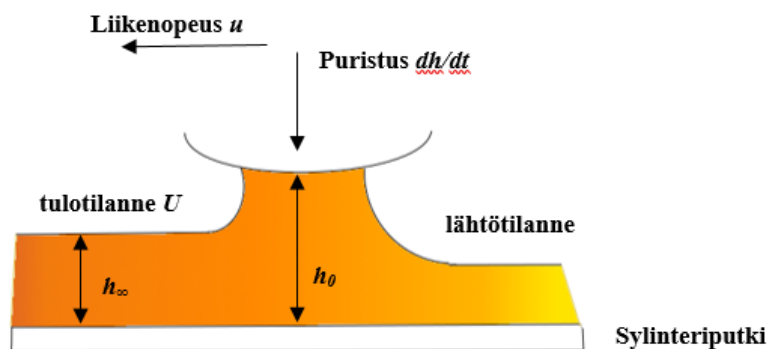
Kuva 10 Männänrenkaan muodonmuutos (Mishra, 2015) mukailten

Ensimmäinen muodonmuutoksen on männänrenkaan säteittäinen puristus ulospäin. Tämä johtuu renkaan ominaisjännityksen ja renkaan taakse päässeiden kaasujen dynamiikan yhteistuloksena. Muodonmuutos on jopa toivottu; kun männänrenkas tulee ulommas männästä, se mahdollistaa tehokkaamman tiivistyksen sylinteriputkea vasten.

Liiallisena se kuitenkin estää riittävän voitelukalvon muodostumisen ja näin aiheuttaa metalli-metalli-kontaktin sylinteriputkea vasten aiheuttaen kitkaa ja hiertymisvaurioita osiin. Aksiaalinen kierto syntyy männänrenkaan vertikaalisen liikkeen ja männänrenkaan ja sylinteriputken kitkan tuotoksena. Muodonmuutos on myönteinen voiteluaineen liikkeelle, sillä männänrenkaan ja sylinteriputken väliin jää kulma, joka työntää voiteluainetta edellään. Liian suurella kulmalla on kuitenkin vaarana osien hankaaminen toisiaan vasten ja kaasun ohivuoto. Männänrenkaan taipumisen syyt ovat männänvälitys, renkaan taipumus aksiaaliseen kiertoon ja tiivistyspintaan kohdistuva radiaalivoima. Kitkan kannalta liike on enemmän oire kuin aiheuttaja, mutta pahimmillaan muodonmuutos saattaa estää männänrenkaan toiminnan kokonaan aiheuttaen useamman kohdan hankausta. Aksiaalinen värinä johtuu männän ja männänrenkaan vaihtuvasta kontaktipinnastakierron aikana ja se aiheuttaa lähinnä hankaamista juurikin renkaan ja männän kontaktipinnoilla (Mishra, 2015).

Kuten yllä on esitetty, myös männänrengasurissa tapahtuu kitkahäviötä männänrenkaan liukuessa radiaalisesti uran pintaa vasten. Kuitenkin, renkaan ja uran vuorovaikutus on vain ajoittaista, ja sen muodostamat kitkahäviöt eivät ole merkittäviä suhteessa renkaiden muihin häviöihin, vaan merkittävämmäksi muodostuu vuorovaikutuksen aiheuttama kuluminen (Wong & Tung, 2016).

3.1.1.1 Männänrenkaiden voitelu



Kuva 11 Männänrenkaan ja sylinteriputken välinen voitelukalvo (Wong & Tung, 2016) mukailten

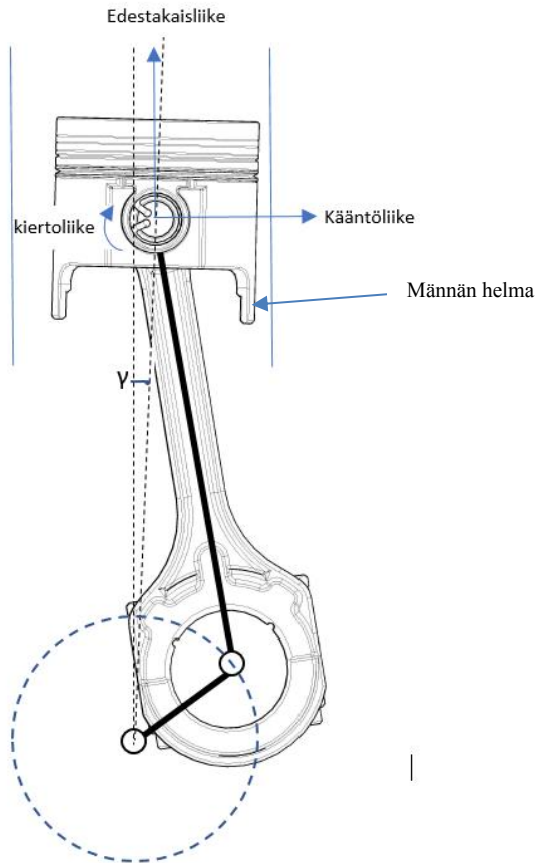
Kuva 11 esittää havainnekuvan öljyn käyttäytymisestä männänrenkaan ja sylinteriputken välissä. Kuvasta voidaan huomata öljyn taipumuksen kerääntyä männänrenkaan liikesuuntaan nähden sen etupuolelle. Männänrenkaan puristus dh/dt on aiemmin mainittu palamiskaasujen ja männänrenkaan ominaisjännityksen yhteensä muodostama puristus sylinteriputkea vasten. Muodostuva hydrodynaaminen paine on mallinnettu matemaattisesti Reynoldsin yhtälöllä, josta alla esitetty yksinkertaistettu muoto, joka ei ota huomioon mm. pinnankarheuksia:

$$\frac{dy}{dx} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{dp}{dx} \right) = -6u \frac{dh}{dx} + 12 \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

missä x on liukupinnan pituus, h voitelukalvon paksuus, p kalvon hydrodynaaminen paine ja μ öljyn viskositeetti.

Pienimmän mahdollisen hydrodynaamisen voitelukalvon paksuuden määräävät männänrenkaan radiaalivoiman ja öljyn paineen välinen voimatasapaino ja paineen ja massan jatkuvuusrajaehdot männänrenkaan reunoilla. Öljykalvon mennessä tarpeeksi ohueksi, muodostuvat sekavoitelu- tai rajavoiteluolosuhteet, joiden tutkimisessa täytyy ottaa huomioon mm. pintojen karheus. Samantyyppiset tutkimukset ovat useimmiten mahdollisia myös öljynkaavintarenkaalle ja öljyrenkaalle (Wong & Tung, 2016).

3.1.2 Männän helma



Kuva 12 Männän sekundaariliike (huom. männänvällys esitetty suunta-antavana)

Männän liike voidaan jakaa kahteen osaan: primaariseen ja sekundaariseen. Primaarinen männän liike on luontainen edestakaisin-liike sylinteriputken keskiakselia pitkin, kun taas sekundaarinen liike johtuu männän ja sylinteriputken väliin jäävän tilan mahdollistamasta männän liikkeestä (kääntöliike) männäntapin ympäri (kiertoliike) (Kuva 12). Männän helman kitkantuohtoa tarkastellessa ennen kaikkea männän sekundaariliike on merkityksellinen, sillä männän kääntyessä niin, että männän ja sylinteriputken keskiakseleiden välille muodostuu kulma γ , männän helma osuu sylinteriputkeen muodostaen vuorovaikutuksessa kitkaa. Jos kampiakseli pyörii myötäpäivään, kuvasta katsoen vasemmanpuoleinen männän helma on painepuolella (eng. *thrust side, TS*) ja oikeanpuoleinen paineettomalla puolella (eng. *anti-thrust side, ATS*). Käytännössä kierron aikana molemman puolen männän helmat voivat ottaa

yhteen sylinteriputken kanssa aiheuttaen kitkaa niiden välillä. (Dolatabadi, Theodossiades, & Rothberg, 2015).

Männän helman isku sylinteriputkeen on siinä määrin merkittävä tapahtuma polttomoottorin toiminnassa, että on laskennallisesti pystytty toteamaan iskussa tapahtuvan kitkavoiman olevan 44% mäntäkokoospanon kokonaiskitkavoimamäärästä ja iskun olevan suurin yksittäinen äänilähde polttomoottorissa (Tan & Ripin, 2014). Iskua sylinteriputkeen on pystytty tutkimaan laser-etäisyysanturin avulla tarkastelemalla missä tilanteissa ja kuinka kauan kosketus tapahtuu. Iskuvoima on laskettavissa liikemäärän kaavojen avulla, joka mahdollistaa myös kitkavoiman ja kitkaväännön määrittämisen.

Männän helman kitkahäviöön voidaan vaikuttaa usealla tavalla, mutta kuten suurimmassa osassa tapauksista, tässäkin pintojen välisen voitelukalvon pysyvyys kynnyskysymykseksi. Männän ja sylinteriputken välissä olevan voitelukalvo on keskimäärin 0,2-8 μm paksu ja sen tulisi estää metallipintojen yhteen osumisen ja sitä kautta vähentää kitkavoimaa. Männän helman iskua tarkastellessa on havaittu, että helman muotoilulla on selkeä vaikutus sekä kitkavoimaan, että äänen voimakkuuteen. Tutkimukset ovat osoittaneet, että männän helman parabolisella helman profiililla voidaan vähentää kitkaa, kun verrokkina käytetään lineaarista männän helmanprofiilia. Tämän ilmiön katsotaan johtuvan parabolisen reunan kyvystä ylläpitää voitelukalvoa lineaarista pidempään. Muita männän helman kitkaan vaikuttavia tekijöitä ovat männän helman ovaalisuus, helman pituus ja männäntapin välitys (Tan & Ripin, 2014).

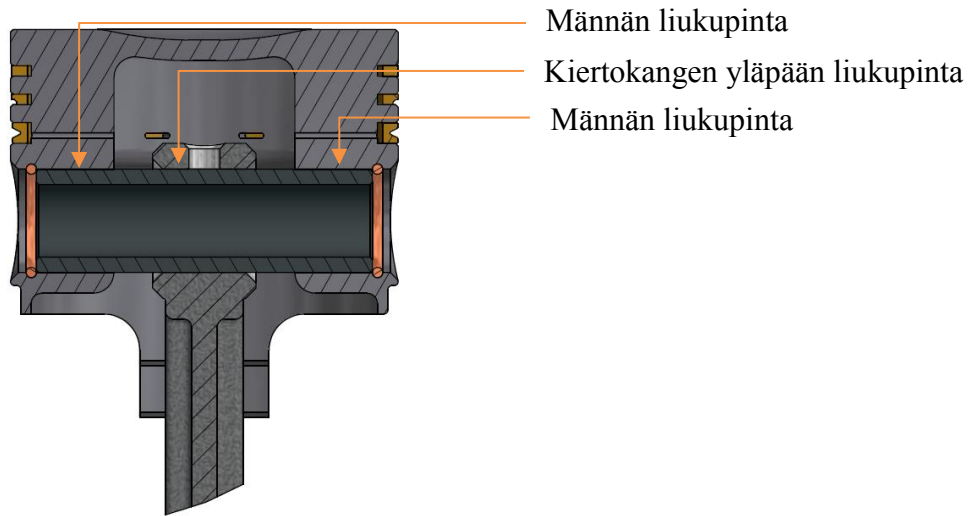
Erilaisella männän helman muotoilulla voidaan vaikuttaa männän helman ja sylinteriputken välilyksen muotoon. Wróblewski et al. mukaan (Wróblewski, Iskra, & Babiak, 2017) männän helman ja sylinteriputken välisen kitkahäviöiden pienentämisen kannalta voitelukalvon peittämän alueen koko on merkittävämpää, kuin kalvon paksuus. Tähän voidaan vaikuttaa männän helman muotoilulla. Yleisimmin käytössä on tynnyrimäinen muotoilu, jossa männän keskiosa on hieman paksumpi tuoden kontaktikohdan lähemmäksi männänrenkaita ja siten vähentäen kitkaa. Porrasmainen muoto ei ole kovin yleisesti käytössä, sillä se vaatii normaalia männän pintaa paremmilla liukuominaisuuksilla varustetun ratkaisun, esimerkiksi männän

pinnoittamisen. Eräs tyypillisimmistä männän pinnoitusmateriaaleista on grafiitti, jolla useimmiten päällystetään männän molemmat sivut, joissa kontakti on mahdollinen. Tämä metodi tuottaa usein rajakitkan olosuhteet, mutta se ei aiheuta huomattavaa nestekitkan muodostumista voitelukalvoon. Wróblewski et al. osoittivat tutkimuksessaan vähentäneensä männän helman kitkahäviötä noin 10% lisäämällä H:n muotoisen grafiitti-kerroksen männän kulumispinnoille. Tutkimuksessa oli huomattavaa myös se, että kitkahäviö laski suuressa koneen nopeudessa hidasta käyntiä paremmin. Kun moottorin käyntinopeutta nostetaan, noussut männän kitkahäviö muuttuu lämmöksi, joka puolestaan lämmittää moottorin elementtejä ja sitä myöten öljyä nopeammin. Öljyn lämmitessä sen viskositeetti putoaa, jolloin saattaa muodostua rajavoitelua ja sitä myöten lisää kitkahäviötä. Tutkimuksen mukaan pinnoituksella on mahdollista pudottaa kitkahäviötä ennen kaikkea suurilla nopeuksilla siten, että mahdollista rajavoitelutilannetta ei esiinny (Wróblewski et al., 2017).

Männän helman ovaalimaiselle muodolle ja sen myönteiselle vaikutukselle männänhelman kitkahäviöihin syyt löytyvät lämmön jakautumisesta männässä. Männäntappi ja siihen liittyvät muodot männässä aiheuttavat männän epätasaisen lämpötilajakauman. Männäntapin kohdalla poikkileikkaus sisältää suuremman pinta-alan kuin ympäristössään ja siten myös lämpöresistanssi on siellä suurempi. Tästä johtuen lämpötila on selvästi suurempi männän helmassa ja lämpödeformaatio männäntappia kohti on suurempi. Männän helman ovaalisuusakseli täytyy olla suuri männäntapin akselia tarkastellessa kohtisuoraan ja männäntapin suuntaisesti pieni, jotta käyntilämpötilassa männän helma olisi sylinteriputken muotoinen, tai ainakin lähellä sitä (Iskra, Babiak, & Wróblewski, 2016).

Männän helman katsotaan myötävän öljyn paineen alla. Tämä helman taipumus muuttaa muotoaan hankaloittaa osaltaan sopivan voitelun järjestämistä männän helmalle (Wong & Tung, 2016). Tutkimuksen mukaan taipuvampi helma mahdollistaa suuremman männän ja sylinteriputken välyksen, jolloin ne on erotettu toisistaan paksummalla voitelukalvolla ja siten pienemmän kitkan (Mansouri & Wong, 2005; Wong & Tung, 2016)

3.1.3 Männäntappi



Kuva 13 Mäntä-kokoonpanon poikkileikkaus

Männäntappia ja sen muodostamaa kitkahäviötä on tutkittu huomattavasti vähemmän kuin edellä esiteltyjä männänrenkaita ja männänhelmaa. Todennäköisesti tämä johtuu verrannollisesti huomattavasti pienemmästä kitkahäviön osuudesta koko moottoria tarkasteltaessa.

Männäntappi on tärkeä elementti mäntäkoneessa. Se siirtää männän mäntäliikkeen ja palamisesta tulevan voiman kampiakselille pyörivän kiertokangen liikkeen avulla. Suurella kuormituksella pienellä liukumispinta-alalla ja usein vajaalla voitelulla männäntappi voi joutua toimimaan erilaisten vallitsevien voiteluolosuhteiden alla. Männäntapille on olemassa useita laakereille tyypillisiä ominaisuuksia, kuten voitelukalvon minimivahvuus, sekundaariliike, ja tehonhäviö (Shi, 2011).

Kuten yllä esitetystä kuvasta (Kuva 13) voidaan nähdä, männäntapilla on käytännössä kolme erillistä liukupintaa. Kaksi liukumistapahtumista tapahtuu männäntapin ja männän välissä ja kolmas männäntapin ja kiertokangen pienemmän laakeripinnan välillä.

Männäntapin ja sen ympäristön analysoiminen on havaittu haastavaksi sen rakenteesta johtuen. Rakennetta voidaan tarkastella kahtena erillisenä laakerirakenteena, jotka ovat yhteydessä toisiinsa pyörimisliikkeen ja männäntapin elastisen muodonmuutoksen

kautta. Vaikeuden tarkasteluun tuo männäntapin pyörimisvauhti, joka ei ole tarkasti määriteltävissä koneen käydessä. Varsinkin männän ollessa yläkuolonkohdassa, on oletettavissa suuria voimia mäntään ja sitä myöten männäntappiin; tällöin männäntapissa ja sen pesässä on odotettavissa huomattavaa taipumista, joka aiheuttaa pintojen huippujen kontaktin toisiinsa normaalisti hydrodynaamisen voitelun alaisissa liukumispinnoissa. (Ba, He, Liu, & Zhang, 2015)

Männäntapin kitkakerroin on mahdollista määrittää karkeasti alla esitetyllä kaavalla olettaen, että männäntappi toimii pääasiassa hydrodynaamisessa voiteluympäristössä.

$$\mu_k = \frac{\mu u}{p}, \quad (2)$$

missä μ_k on kitkakerroin, μ on öljyn viskositeetti, u on pintojen välinen suhteellinen nopeus, joka on verrannollinen moottorin kierrosnopeuteen ja p on kuormitus pinta-alaa kohden. (Wong & Tung, 2016)

3.1.4 Kiertokangen/kampiakselin laakeri



Kuva 14 Kiertokangen laakerin liukupinta ja voitelu-urat

Kiertokangen alapää on yhdistetty kampiakseliin tyypillisellä liukulaakerikokoonpanolla. Öljy kuljetetaan laakeripinnoille omaa öljykanavaa ja koko laakerin ympärysmittan pituista voitelu-uraa hyödyntämällä. Tyypillisesti

liukulaakerissa on myös ura ja reikiä varmistamaan öljyn pääsy toisellekin laakeripinnalle. Kampiakselin kitkahäviön tuottavat akselin päiden laakeripinnat, nk. runkolaakerit, joilla kampiakseli on tuettu moottorilohkoon ja kiertokangen liukulaakerit. Kampiakseli tuottaa n. 25-35% polttomoottorin kitkahäviöistä(Wong & Tung, 2016)

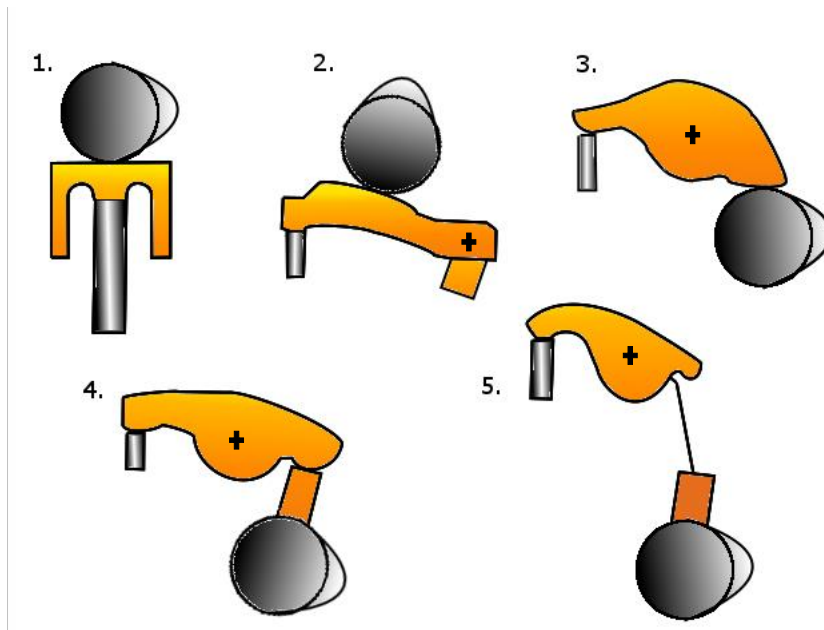
Kiertokangen ja kampiakselin välinen laakeri pysyy pääosin hydrodynaamisena. Laakerin voitelu on yleensä järjestetty kampiakselia pitkin.

Valtaosa kampiakselin kitkasta muodostuu runkolaakereista ja niiden tiivisteistä. Kampiakseli lepää lohkon ja akselin välissä olevan öljypatjan päällä. Kampiakselin keskiakseli ei ole tällöin kuitenkaan samassa linjassa laakeripesän keskilinjan kanssa, vaan pieni välys erottaa keskilinjan toisistaan. Tällainen järjestely on välttämätön, koska tämä välys muodostaa hydrodynaamiset voiteluolosuhteet akselin pyöriessä. Hyvällä öljynsyötöllä onkin mahdollista saavuttaa pääosin hydrodynaaminen voitelu koko moottorin käynnin ajan. Runkolaakereiden tiivisteet ovat käytännössä kontaktissa kampiakseliin koko ajan, jolloin niillä voidaan olettaa olevan kiinteä kitkakerroin. Luonnollisesti tiivisteiden aiheuttama kitka on tällöin verrannollinen akselin pyörimisnopeuteen (Wong & Tung, 2016).

3.2 Venttiilikoneisto

Venttiilikoneisto koostuu useista mekaanisista osista, joiden pääasiallinen tarkoitus on avata ja sulkea moottorin kannen venttiilit mahdollistaen polttoaineseoksen pääsyn palotilaan ja pakokaasujen pääsemisen pakosarjaan. Venttiilikoneistossa nokka-akselin rotaatioliike muutetaan venttiilin liikkeeksi, joka on venttiilinvarren akselin varrenmyötäistä. Nokka-akselin nokkien asennot määräävät venttiilien oikea-aikaisen aukeamisen ja sulkeutumisen. Venttiilikoneiston nokka-akseleineen on arvioitu eri lähteiden mukaan olevan n. 10%-20% polttomoottorin kitkahäviöistä (Wong & Tung, 2016). Liikkeen siirtämisen nokka-akselilta venttiilille on useita mahdollisuuksia ja alla on esitettyinä näistä tyypillisimmät (Kuva 14). Jokaisessa mallissa nähdään pisaramaiset nokka-akselin poikkileikkaukset, venttiilin vivut (merkitty oranssilla) ja venttiilin varren yläosat.

1. Suoratoiminen OHC (engl. overhead camshaft, sylinterikannen yläpuolinen nokka-akseli)
2. OHC Päädyn ympäri kääntyvä vipu
3. OHC Keskipisteen ympäri kääntyvä vipu
4. OHC Keskipisteen ympäri kääntyvä vipu venttiilinnostimella
5. Nokka-akseli lohkossa, Keskipisteen ympäri kääntyvä vipu työntötangolla



Kuva 15 Tyypillisimmät venttiilinohjausmenetelmät (Wong & Tung, 2016)

Nokka-akseliin kohdistuu kitkavoimia sen päädyissä olevista laakeripinnoista ja venttiilien vuorovaikutuksesta. Nokka-akselin laakerointi on hyvin samantapainen, kuin kampiakselin, vaikkakin niissä vallitsevat voimat ovat hyvin eri luokkaa. Sylinterin paineen tuottama kuorma kampiakselille on huomattavasti suurempi, kuin nokka-akselille lähinnä venttiilien säätelystä aiheutuva kuorma. Nokka-akselin liukulaakereiden voitelu on pääosin hydrodynaamista suhteellisin tasaisista olosuhteista johtuen. Arvioiden mukaan nykyaikaisen venttiilikoneiston koko kitkakulutuksesta n. 12% (Comfort, 2003; Wong & Tung, 2016) johtuu nokka-akselin laakereista.

Nokan ja venttiilinnostimen välissä voi tyypillisesti olla liukupintana tasainen pinta, tai rulla. Tasaisella pinnalla varustetulla nostimella paikallinen kuorma, voitelukalvon paksuus ja kitka vaihtelevat nokan asennon mukaan suhteessa venttiilinnostimeen.

Nokan kärjen koskettaessa nostimeen paikallinen kuorma on suuri ja kohdistunut pienelle pinta-alalle, jolloin tyypillisesti esiintyy rajavoitelua. Muulloin voitelu pysyy pääosin sekavoiteluna. Sekavoitelutilassa voiteluaineen viskositeetti riippuu paineesta, ja elastohydrodynaaminen voitelu on mahdollinen. Nokan ja venttiilinnostimen välisen vuorovaikutuksen sekavoiteluineen ja hetkittäisten rajavoitelupiikkeineen katsotaan aiheuttavan suurimman osan venttiilikoneiston kitkasta.

Venttiilin vivun ja sen akselin välillä vallitsee pääosin rajavoitelutila, johtuen voiteluaineen hankalasta saatavuudesta liukupinnoille. Tämä johtuu lähinnä pienistä välyksistä ja ahtaasta tilasta liukupinnan ympäristössä.

Venttiilinvarsi, venttiilinvarrentiiviste ja venttiilinohjain ovat osia, jotka ovat yhteydessä suoranaisesti venttiilin edestakaiseen liikkeeseen ja siten vuorovaikutuksessa syntyy kitkaa. Yleisesti suhteellisen hitaassa edestakaisessa liikkeessä oletetaan voitelun pysyvän rajavoiteluna. Nopeassa liikkeessä, kuten männänrenkaiden liike sylinterissä muodostuu hydrodynaamista voitelua (Wong & Tung, 2016).

4 KITKAN REDUSOINTI

Varsinkin puhuttaessa henkilö- ja tavaraliikenteestä, ajoneuvojen kulutus on keskustelua herättävä aihe. Vuosien mittaa ajoneuvojen energiakulutusta on pystytty vähentämään merkittävästi, mutta merkittävä osa polttoaineen tuomasta energiasta menee yhä moottorin itse aiheuttamien kitkavoimien peittoamiseen huonontaen polttoaineen hyötysuhdetta. Aikaisemmin on esitetty polttomoottorin yleisimpiä kitkahäviön kohteita ja näihin on esitetty alla toimenpiteitä kitkan vähentämiseksi (Gangopadhyay, 2017; Truett, 2013).

Laakereiden kitkaominaisuuksia on kehitetty pienentämällä laakereiden liukupinta-alaa. Isompiin laakereihin on kehitetty mm. polymeeripinnoitteita, joilla on saatu tuotettua jopa 50% pienempi kitkahäviö verrattuna pinnoittamattomiin laakereihin.

Männän kitkahäviötä on pyritty hillitsemään männän helman kokoa pienentämällä, ja kuten aikaisemmin todettu, helman optimaalisella muodolla ja pinnoituksella. Helma voidaan pinnoittaa keraamisesti, tai polymeereillä. Tyypillisesti on käytetty grafiittia, hiilikuitua ja molybdeenidisulfidia. Männänrenkaisuun ratkaisua on haettu pienemmällä jännityksellä sylinteriputken seinämää vasten, joilla pystytään muodostamaan 50% pienempi paine seinämää vasten ja sen myötä laskemaan kitkaa. Itse sylinteriputkeakin on pyritty kehittämään materiaalivalinnoilla, pinnankarheuden minimoimisella ja pinnoituksilla.

Myös venttiilikoneiston kitkahäviötä on saatu pienentymään mm. erilaisilla venttiilinnostimien pinnoitteilla, joilla on todistetusti pystytty vähentämään kitkaa 10%. Jakoketjut pyritään tehdä mahdollisimman pienikokoisiksi ja ketjunohjaimet mahdollisimman liukkaiksi. Venttiilin vipuihin on kehitetty matalakitkaisia rullia.

On arvioitu, että puolet mäntäkokoanpanon, kampiakselin ja pyörivien komponenttien aiheuttamasta kitkahäviöstä tapahtuu hydrodynaamisessa voitelussa (Gangopadhyay, 2017; Heywood, 1988). Tehon häviö hydrodynaamisessa voitelussa on verrannollinen voiteluaineen viskositeettiin. Laskemalla viskositeettia on mahdollista saavuttaa

pienempi kitkahäviö, mutta se vaatii paljon moottorin komponenteilta, sillä käytännössä matalampi viskositeetti tarkoittaa ohuempaa voitelukalvoa osien välillä.

Polttomoottorin pienempiin kitkahäviöihin pääsemiseksi voidaan tällä hetkellä sanoa olevan kolme näkökulmaa (Wong & Tung, 2016):

1. Kitkan vähentäminen mekaanisella suunnittelulla ja kitkan huomioon ottavilla ratkaisuilla
2. Pinnan käsittely pinnankarheuksien pienentämiseksi joko työstömenetelmillä, tai pinnoittamisella
3. Kitkan vähentäminen voitelu- ja lisäaineiden kautta

5 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin polttomoottorin komponenttien tuottamia kitkahäviöitä. Kitkahäviöt ovat hyvin sidoksissa tribologiaan, joka tutkii kitkaa, kulumista ja voitelua. Huomattavaa oli eritoten eri voiteluolosuhteiden muutokset ja niiden vaikutus kitkaan ja kulumiseen. Mäntäkokoontapano osoittautui suureksi kitkahäviön lähteeksi, eritoten painerenkaat, jotka yhtenä pienimmistä osista kuitenkin muodostavat yhden suurimmista yksittäisistä kitkahäviötä tuottavista komponenteista.

Männän helman isku vasten sylinteriputkea *piston slap*, männän sekundaariliikkeen luoma tapahtuma on itsessään hyvin merkittävä sekä kitkahäviön, että äänisaasteen suhteen. Männäntapin tutkimus puolestaan voi olla hyvin haastavaa, sillä tapissa on käytännössä kolme erillistä laakeripintaa ja mittaukset ovat hankala järjestää männäntapin sijainnista johtuen.

Kampiakseli muodostui myös isohkoksi kitkan aiheuttajaksi, tosin oikeanlaisella voitelulla sekä runkolaakerien, että kiertokangen laakerien tulisi pysyä koneen pyöriessä hydrodynaamisella voitelulla vähentäen sen kitkaa.

Venttiilikoneistossa on useita eri mekaanisesti liikkuvia osia ja eräiden arvioiden mukaan se tuottaakin jopa 13% moottorin kitkahäviöistä, mikä kuulostaa suhteellisen suurelta verrattuna venttiili koneiston pieniin kuormiin.

Kitkaa on pyritty vähentämään vuosien mittaa, ja lupaavia tuloksia on onnistuttu saamaan. Vielä ennen uusien teknologioiden keksimistä kolmen kohdan parannuslista pitää paikkaansa: suunnittelu, pinnoitus, voitelu.

Työssä ei otettu juuri kantaa materiaalivalintoihin, pinnanlaatuihin, tai pinnoituksiin, joista löytyy myös runsaasti tutkimuksia ja kirjallisuutta, ja joista voisi kirjoittaa saman laajuisen kirjallisuuskatsauksen kustakin. Kuten jo aikaisemmin todettu, mäntäkokoontapanosta, erityisesti männänrenkaista löytyy todella paljon tutkimuksia ja se näkyy myös työssä. Laajemmin pienempiin komponentteihin on hankala löytää tietoa, sillä esitetyn tyyppisen moottorin perusteisiin jokainen valmistaja tekee hieman

erilaisia ratkaisuja. Kuitenkin, vielä jonkin aikaa autoteillä mennään perinteisillä mäntämootoreilla, eikä kitkahäviöiden kanssa taisteleminen lopu vielä senkään jälkeen.

6 LÄHDELUETTELO

References

Ba, L., He, Z., Liu, Y., & Zhang, G. (2015). Analysis of piston-pin lubrication considering the effects of structure deformation and cavitation. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 16(6), 443-463. doi:10.1631/jzus.A1400105

Comfort, A. (2003). *An introduction to heavy-duty diesel engine frictional losses and lubricant properties affecting fuel economy - part I*. (). doi:10.4271/2003-01-3225

Dietsche, K., & Dietsche, K. (2011). *Automotive handbook* (8th ed., rev. and exp ed.). Plochingen: Robert Bosch.

Dolatabadi, N., Theodossiades, S., & Rothberg, S. J. (2015). *On the identification of piston slap events in internal combustion engines using tribodynamic analysis* doi://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.11.012

Gangopadhyay, A. (2017). A review of automotive engine friction reduction opportunities through technologies related to tribology. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(2), 527-535. doi:10.1007/s12666-016-1001-x

Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York <>: McGraw-Hill.

Iskra, A., Babiak, M., & Wróblewski, E. (2016). The problems of piston skirt microgeometry in combustion engines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 148(1), 012068.

Jaana Tamminen, & Carl-Erik Sandström. (2002). *Piston ring tribology*. (). Espoo: Otamedia Oy.

Kivioja, S., Kivivuori, S., & Salonen, P. (2001). *Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu* (3.th ed.) Otatiето.

Mansouri, S. H., & Wong, V. W. (2005). Effects of piston design parameters on piston secondary motion and skirt - liner friction. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 219(6), 435-449.

doi:10.1243/135065005X34026

Mishra, P. C. (2015). *Modeling the root causes of engine friction loss: Transient elastohydrodynamics of a piston subsystem and cylinder liner lubricated contact*

doi:8080/10.1016/j.apm.2014.10.011

Morris, N., Rahmani, R., Rahnejat, H., King, P. D., & Fitzsimons, B. (2013). *Tribology of piston compression ring conjunction under transient thermal mixed regime of lubrication*

doi:8080/10.1016/j.triboint.2012.09.002

Shi, F. (2011). An analysis of floating piston pin. *SAE Int.J.Engines*, 4(1), 2100-2105.

doi:10.4271/2011-01-1407

Söderfjäll, M., Herbst, H. M., Larsson, R., & Almqvist, A. (2017). *Influence on friction from piston ring design, cylinder liner roughness and lubricant properties*

doi:8080/10.1016/j.triboint.2017.07.015

Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4. ed. ed.).

Amsterdam [u.a.]: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Tan, Y., & Ripin, Z. M. (2014). *Technique to determine instantaneous piston skirt friction during piston slap* doi:8080/10.1016/j.triboint.2014.02.014

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. (2012). Kolmasosa henkilöauton polttoaineesta kuluu kitkan voittamiseen.

Truett, R. (2013). Chafing against engine friction. *Automotive News*,

Wong, V., & Tung, S. (2016). Overview of automotive engine friction and reduction trends—Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. *Friction*, 4(1), 1-28. doi:10.1007/s40544-016-0107-9

Wróblewski, E., Iskra, A., & Babiak, M. (2017). *Geometrical structures of the stepped profile bearing surface of the piston* doi://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.166