



SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM  
AUDI HUNGARIA  
JÁRMŰMÉRNÖKI KAR

## **TDK dolgozat**

# **Kísérlettervezés optimalizálása alternatív tüzelőanyaggal szennyezett kenőolaj súrlódási és kopási paramétereinek meghatározásához**

**Pintér Dominika**

**[Járműmérnöki MSc szak, 2. évfolyam]**

**[Belsőégésű motorok modul]**

**Konzulens: Dr. Nagy András Lajos – tudományos munkatárs**

**Győr, 2023**

## Kivonat

Az alternatív tüzelőanyagokkal szennyezett kenőolajok tulajdonságait vizsgáló szakirodalom csekély része foglalkozik benzinüzemű gépjárművek kenőolajrendszerének tribológiai elemzésével. A rendelkezésekre álló kutatások tapasztalatainak figyelembevételén kívül kísérlettervezési módszertan alkalmazása szükséges a költség- és időhatékony ugyanakkor eredményes mérési terv előkészítéséhez.

A kutatás tárgya egy 20% etanol tartalmú benzin üzemanyaggal szennyezett, 0W20 viszkozitású kenőolaj tribométeres és felületanalitikai vizsgálata kísérlettervezési módszertan alkalmazásával. Az eredmények összehasonlítása érdekében a kísérletek referencia és mesterségesen öregített, 0W20 viszkozitású kenőolajjal is megismétlésre kerültek. A dolgozat ezen kívül feldolgozza az alternatív tüzelőanyag okozta kenőolajdegradáció hatásait, a tribológia területén alkalmazott eszközök működési elvét, továbbá a kísérlettervezési módszertanok relevanciáját.

A dolgozat egyik fő célja az alternatív tüzelőanyaggal szennyezett kenőolaj kedvező kopási és súrlódási tulajdonságainak alátámasztása golyó-tárcsa elrendezésű Optimol SRV®5 oszcilláló tribométer, Leica DCM3D konfokális mikroszkóp, Keyence VHX-1000 digitális optikai mikroszkóp és Bruker Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia felhasználásával. Mindemellett a kutatás magában foglalja a kísérlettervezésben alkalmazott másodfokú modell felépítését is, amely a tribométeres kísérletek eredményeivel közel azonos értékeket generál. A tribométeres és felületanalitikai vizsgálatok eredményeinek szemléltetése az R szoftver segítségével valósult meg.

# Tartalomjegyzék

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés .....                                                                       | 1  |
| 2. Irodalomkutatás .....                                                                 | 3  |
| 2.1. Alternatív tüzelőanyagok tulajdonságai .....                                        | 3  |
| 2.2. A kenőolaj degradációjának vizsgálata .....                                         | 4  |
| 2.3. Dugattyúgyűrű-hengerfal tribológiai rendszer .....                                  | 5  |
| 2.4. Alternatív tüzelőanyagok hatása az olajdegradációra .....                           | 6  |
| 2.4.1. Etanollal szennyezett benzinüzemanyag hatása a kenőolaj minőségére .....          | 6  |
| 2.4.2. Etanol-égéstermékekkel mesterségesen öregített kenőolaj vizsgálata .....          | 7  |
| 2.4.3. Bioetanollal szennyezett üzemanyagkeverékek hatása a dugattyúgyűrűk kopására .... | 7  |
| 2.5. Összegzés .....                                                                     | 8  |
| 3. A kísérlettervezés módszertana .....                                                  | 9  |
| 4. A kísérlet során alkalmazott módszerek és eszközök .....                              | 11 |
| 4.1. Kísérlettervezés (DOE) .....                                                        | 11 |
| 4.2. Optimol SRV®5 tribométer .....                                                      | 13 |
| 4.3. Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóp .....                                         | 15 |
| 4.4. Leica DCM3D konfokális mikroszkóp .....                                             | 16 |
| 4.5. Viskoziméter .....                                                                  | 16 |
| 4.6. Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR) .....                      | 17 |
| 5. Kísérleti eredmények .....                                                            | 19 |
| 5.1. Súrlódási együttható vizsgálata (COF) .....                                         | 19 |
| 5.2. Átlagos kopásátmérő vizsgálata (AWSD) .....                                         | 22 |
| 5.3. Kopástérfogat vizsgálata ( $W_v$ ) .....                                            | 23 |
| 5.4. Spektroszkópia és viszkozitás vizsgálata .....                                      | 24 |
| 5.5. Másodfokú modell létrehozása a kísérleti eredmények alapján.....                    | 26 |
| 5.5.1. 0W20 viszkozitású referencia kenőolaj modellje.....                               | 27 |
| 5.5.2. 0W20 viszkozitású, mesterségesen öregített kenőolaj modellje .....                | 29 |
| 5.5.3. 0W20 viszkozitású, alternatív tüzelőanyaggal szennyezett kenőolaj modellje.....   | 30 |
| 5.6. Másodfokú modell validálása és kiegészítése új eredményekkel .....                  | 31 |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 6. Összegzés.....                        | 33 |
| Ábrajegyzék.....                         | 35 |
| Táblázatjegyzék.....                     | 36 |
| Rövidítések és szimbólumok jegyzéke..... | 37 |
| Irodalomjegyzék .....                    | 38 |

## 1. Bevezetés

A dolgozatban tárgyalt témakör relevanciáját az egyre szigorodó károsanyag-kibocsátási normákhoz való igazodás és a kőolajalapú tüzelőanyagok leváltását sürgető környezetvédelmi törekvések adják.

Az elektromos mobilitás elmúlt években tapasztalható térnyerése háttérbe szorította a belsőégésű motorok fejlesztését. Úgy tűnt, hogy a belsőégésű motorok már nem képesek a döntéshozók által kiszabott normák paramétereinek betartására, így a járműgyártók többsége áttért az alternatív hajtású járművek fejlesztésére és gyártására. A szigorodó károsanyag-kibocsátási normákon kívül a döntéshozók előterjesztették a belsőégésű motorral hajtott járművek gyártásának betiltását is 2030-tól. A cél egy zéró-emissziójú jármű megalkotása, amely a gyártósori folyamatok első lépésétől a városi forgalomban való részvételig karbon-semlegesnek minősül. Ez viszont a gyártósorok átalakítását is magában foglalja. E jövőkép megvalósulásához nem csak a gyártósori infrastruktúrát kell átalakítani, hanem megfelelő villamos hálózatot is ki kell építeni. Ilyen gyors léptékű átállásra pedig sem az ipar, sem pedig a jelenleg rendelkezésre álló technológia nem alkalmas.

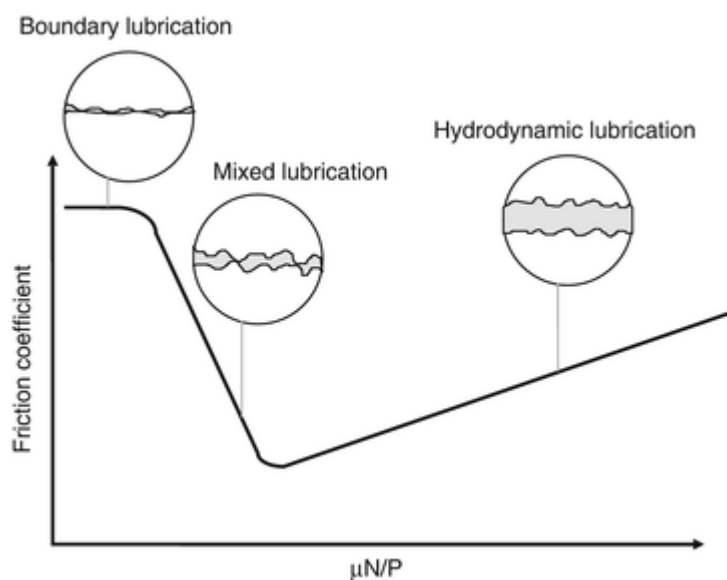
Az elektromos és hibrid-hajtású járművek töltésének problémaköréhez a kiépítetlen töltőhálózat, illetve az akkumulátorok rövid hatótávolsága tartozik. Míg városi használatra, rövidtávú közlekedésre tökéletes megoldás lehet egy alternatív hajtású jármű, addig a fuvarozás, szállítmányozás és tömegközlekedés területén kérdéses ezek létjogosultsága. Olyan megoldást kell tehát találni, ami a különböző járműalkalmazásoknak megfelelően segíti elő a környezettudatosságot.

Ilyen megoldás lehet például az alternatív tüzelőanyagok alkalmazása, amelyek nem csak leváltják a fosszilis tüzelőanyagokat, de a belsőégésű motorok károsanyag-kibocsátását is csökkentik. Mivel a tüzelőanyag kis térfogatszázalékban ugyan, de bejut a kenőanyagrendszerbe, azt is meg kell vizsgálni, hogy hogyan befolyásolja a kenőanyag fizikai-kémiai tulajdonságait.

A dolgozat az alternatív tüzelőanyagok kenőolaj degradációra gyakorolt hatásán kívül egy kísérlettervezési módszertan segítségével három különböző alacsony viszkozitású kenőolaj tribométeres vizsgálatát is magában foglalja. A cél egy olyan másodfokú modell felépítése volt, amely a kísérletek eredményeivel közel azonos értékeket generál.

A jelen kutatás eredményei közötti összefüggések feltárása a kísérletek során fennálló komplex tribológiai összefüggések miatt több tényező átfogó vizsgálatával valósult meg. A vizsgált rendszert az etanol jelenlétéből adódó viszkozitás csökkenése, továbbá az etanol

határrétegre gyakorolt hatása is befolyásolta, amit korábbi kutatások is alátámasztanak. [1.] A tribométeres kísérletek során hidrodinamikai és kevert kenésállapotok is kialakultak, azonban a viszkozitás csökkenésével és ebből adódóan az elvékonyodott olajfilm átszakadásával a kevert súrlódási állapot lett meghatározó. Ahogy az alább található Stribeck-görbe is mutatja, kevert kenési állapot esetén a súrlódási együttható minimális értékre csökken, azonban a kopás mértéke megnövekedik a hidrodinamikai állapothoz képest. Hidrodinamikai kenésállapot esetén csökken a kopás mértéke, de a viszkozus folyadék belső súrlódásának köszönhetően megnő a súrlódási együttható. A rendszer komplexitását tovább mélyíti az etanol párolgása is, ami a hőmérséklet növekedésével arányosan mérsékeli a viszkozitás csökkenését.



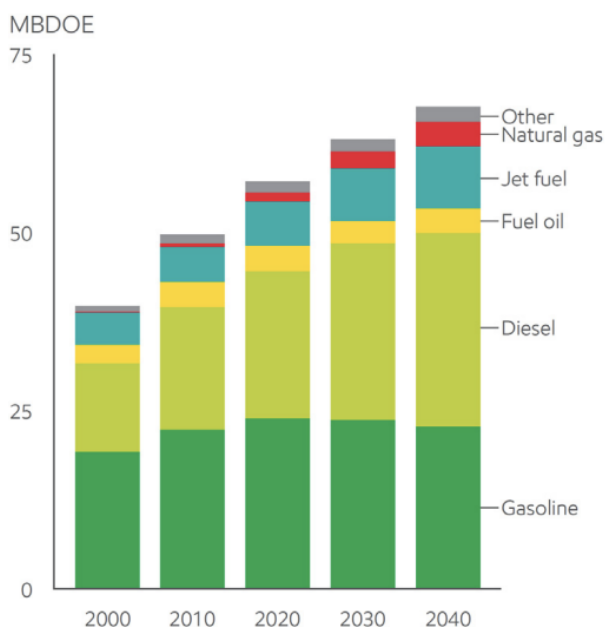
1. ábra: Stribeck-görbe sematikus ábrája [2.]

## 2. Irodalomkutatás

A kísérleti módszertan kidolgozása előtt a kutatási terület feltérképezésére volt szükség a kutatási rés meghatározásához. Az alternatív tüzelőanyagok általános bemutatását követően, a kenőanyag degradációra gyakorolt hatásaikat vizsgáló tanulmányokat foglaltam össze. A dugattyúgyűrű-hengerfal rendszer tribométeres vizsgálatának elemzése megalapozta a saját kísérlet összeállítását, amit a kísérlettervezésben alkalmazott „central circumscribed” módszertannal végeztem el.

### 2.1. Alternatív tüzelőanyagok tulajdonságai

Az elmúlt évtizedek technológiai, járműipari fejlődése és népességnövekedése miatt egyre nagyobb lett a kereslet a fosszilis tüzelőanyagok iránt. A belsőégésű motorban lezajló kémiai folyamatok melléktermékeként viszont környezetkárosító vegyületek jönnek létre, amelyek a környezet mellett az emberre is veszélyesek. A belsőégésű motorok kereskedelmi forgalomból való kiszorítása helyett a kutatók a fosszilis tüzelőanyagok leváltását szorgalmazzák alternatív lehetőségek bemutatása mellett. Világszerte kutatások folynak azzal kapcsolatban, hogy melyek azok az alternatív tüzelőanyagok, amelyekkel nemcsak a károsanyag-kibocsátás csökkenését, de a motorteljesítmény javítását is elérhetnék. [3.]



2. ábra: A közlekedési szektorban előre jelzett globális kereslet üzemanyag típusok szerint 2000-től 2040-ig [3.]

Ezek az alternatív tüzelőanyagok a közlekedési ágazaton kívül számos szektorban megoldást jelenthetnek arra a problémára, ami már évek óta körvonalazódik. Olyan megújuló

energiaforrásokból származó stabil ellátásra van szükség, ami leválthatja a véges mennyiségben elérhető fosszilis tüzelőanyagokat. Az előrejelzések szerint az elkövetkezendő 20-30 évben még biztosan a kőolaj-alapú üzemanyagok uralják majd a piacot, azonban a környezettudatosság fejlődésével egyre nagyobb teret nyernek majd a megújuló forrásból származó alternatív tüzelőanyagok is. [3.]

## 2.2. A kenőolaj degradációjának vizsgálata

A kenőolaj kiemelt fontosságú komponense a belsőégésű motoroknak, mivel az alkatrészek megfelelő kenése, hűtése és tisztítása nélkül a motor könnyen és gyorsan károsodhat, vagy akár használhatatlanná is válhat. [4.]



3. ábra: Elhasználódott kenőolaj a motorban [4.]

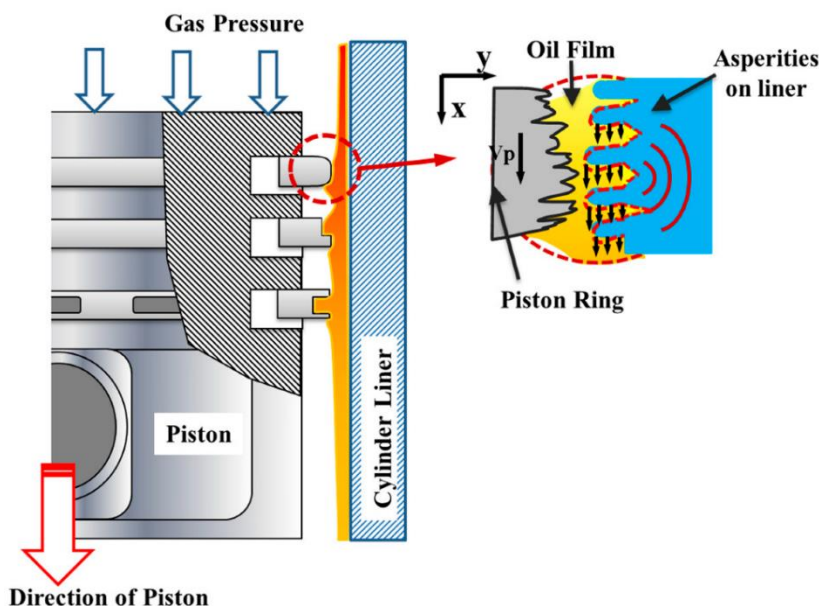
A kenőolajnak a motorban uralkodó kedvezőtlen üzemi körülmények között – magas hőmérsékleten és magas fordulatszám tartományban is megfelelően kell teljesítenie. A dolgozat szempontjából kiemelt alkatrészcsoporthoz vizsgálatának relevanciáját az adja, hogy egy normál üzemelés során a dugattyú sebessége a 20 m/s-ot is elérheti, így kritikus fontossággal bír ennek a területnek a folyamatos és megfelelő minőséggel és mennyiséggel történő kenése. Az olajtársaságok évtizedek óta dolgoznak azon, hogy különböző járműalkalmazásoknak megfelelő kenőanyagokat állítsanak elő a bázisolajok és az adalékanyagok fejlesztésével. [4.]

A kenőolaj minősége azonban a levegő oxigéntartalmának köszönhetően idővel romlani fog, mely jelenséget olajöregedésnek neveznek. Az olajtársaságok ezt kiküszöbölendő szűk csereperiódusokat jelölnek meg, aminek betartásával elkerülhető a motor károsodása. Ezt az

oxidációs folyamatot a magas hőmérséklet még inkább felgyorsítja, mivel termikus bomlásnak indulnak a bázisolaj reaktív szénhidrogénjei és a viszkozitásmódosító adalékanyagok is. További nehézségeket okoz az is, hogy a motorolajok kémiai-fizikai tulajdonságai nagyban befolyásolják az égés során keletkező károsanyagok összetételét és az emisszió mennyiségét is. [4.]

## 2.3. Dugattyúgyűrű-hengerfal tribológiai rendszer

A dugattyúgyűrű és a hengerfal alkatrészpár nagy terhelésnek, erőhatásnak és magas hőmérsékletnek van kitéve. Ezek a paraméterek nem csak a környező alkatrészeket érintik, hanem a hengerfalon kialakuló olajfilm réteget is, ahol annak hőmérséklete elérheti akár a 300 °C-t is. A nagy igénybevétel és a magas hőmérséklet a kenőanyag öregedését is felgyorsítja, károsítva ezzel a bázisolaj és az adalékanyagok tulajdonságait. Az égéstér közelsége miatt ez a rendszer szoros kapcsolatban van az égéstermékekkel is, amelyek szintén befolyásoló tényezői a kenőolaj minőségének. A hengerfalon kialakuló olajfilmréteg célja a dugattyúgyűrűk és a hengerfal kopásának csökkentése, valamint hűtőközegként is szolgál, ami elvonja a hőt a tűzgáttól. Ennek megfelelően, ha a kenőolaj elér egy bizonyos mértékű károsodást, akkor le kell cserélni. [5.]



4. ábra: A belsőégésű motor hengerfalán kialakuló olajfilm réteg [5.]

Az alternatív tüzelőanyagok előtérbe kerülésével megjelentek a kenőanyagok tulajdonságaira gyakorolt hatásukat vizsgáló tanulmányok. Az már bebizonyosodott az „Alternatív tüzelőanyagok” című fejezetben, hogy károsanyag-kibocsátás szempontjából felvehetik a versenyt az alternatív hajtású járművekkel. A kérdés már csak az, hogy ez a

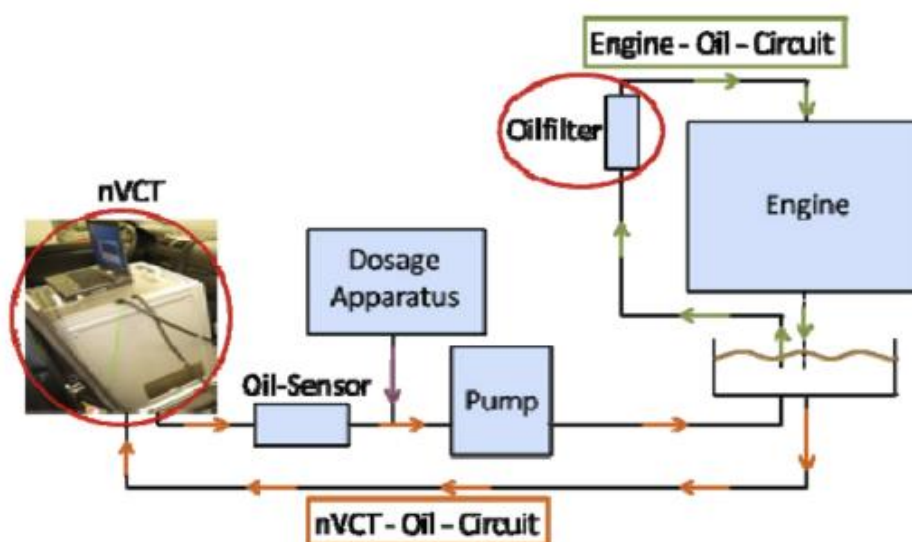
megoldás kompromisszumot jelent-e a károsanyag-kibocsátás csökkenése és a kenőolaj degradáció mértékének növekedése között.

## 2.4. Alternatív tüzelőanyagok hatása az olajdegradációra

Ez a fejezet azokat a tanulmányokat tartalmazza, amelyekben azt vizsgálják, hogy a különböző alternatív tüzelőanyagok milyen hatást gyakorolnak a belsőégésű motorokban alkalmazott kenőanyagok tulajdonságaira, illetve a dugattyúgyűrű-hengerfal rendszerre.

### 2.4.1. Etanollal szennyezett benzinüzemanyag hatása a kenőolaj minőségére

A 2010-es tanulmányban hagyományos közvetlen befecskendezésű motorral ellátott járművet használtak próbapadon. A tribológiai rendszer kopását a járműbe épített radionuklid technológiás online kopásméréssel (nVCT) monitorozták. [6.]

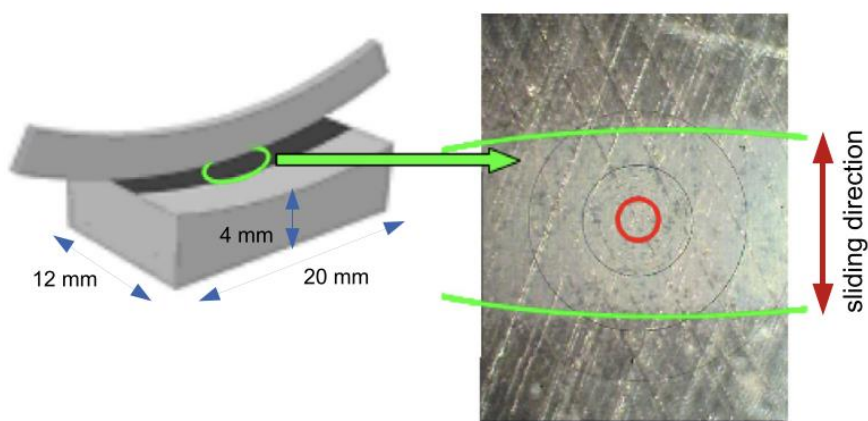


5. ábra: Az nVCT mérés A mérőkör beépítése a kenőanyag-körbe [6.]

A vizsgálathoz a dugattyúgyűrűket aktiválták vasból előállított radioaktív izotópokkal. A vezetési ciklus egy kisterhelésű, alacsony sebességű, valamint egy megnövelt működési paraméterekkel rendelkező munkapontból állt. A vizsgálathoz használt kenőolajat mesterségesen öregítették magas hőmérsékleten, etanol égéstermék hozzáadásával, illetve anélkül. A két kiválasztott motorolajjal végzett kopásmérések hasonló kopásképződést mutattak, ami hasonló olajteljesítményre utal, viszont a nagyobb károsodási potenciállal rendelkező égéstermék hozzáadása nagyobb kopásképződést okozott. [6.]

### 2.4.2. Etanol-égéstermékekkel mesterségesen öregített kenőolaj vizsgálata

A 2015-ös tanulmányban egy SAE 15W-40 és egy SAE 5W-30 viszkozitású motorolajat hasonlítottak össze friss és mesterségesen szennyezett állapotában. A mesterséges szennyezés során acetaldehidet vagy ecetsavat adtak az olajhoz, amelyek kémiai igen reaktív anyagok. Ezeket a kenőanyagokat tribometriai kísérleteknek vetették alá egy Optimol SRV4 tribométeren, majd a kopási minták felületanalitikai vizsgálatát egy röntgen-fotoelektron spektroszkópiával (XPS) elemezték. [7.]

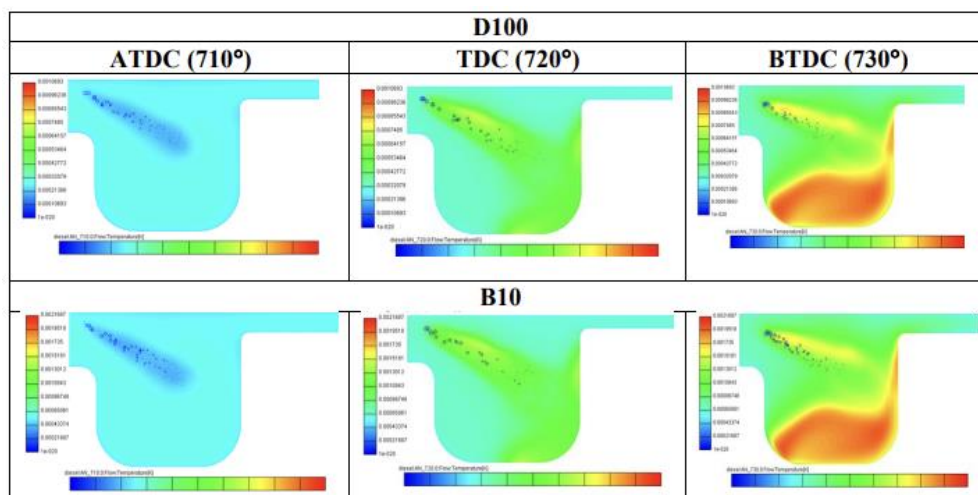


6. ábra: Baloldalon a dugattyú-gyűrű és a hengerfal szegmens látható, zöld ellipszissel jelölve a kopási zónát. A jobb oldali képen a kopási zóna van kinagyítva, piros körrel jelölve a vizsgált területet. [7.]

Az acetaldehiddel történő változtatás a kopásgátló adalékanyagokat, az ecetsavval történő változtatás a detergenset érintette. A friss kenőanyagok kisebb mértékű bejáratási kopást és magasabb állandósult kopási arányt eredményeztek, míg a módosított olajok esetében ez fordítva volt. [7.]

### 2.4.3. Bioetanollal szennyezett üzemanyagkeverékek hatása a dugattyúgyűrűk kopására

A 2022-ben megjelent tanulmány 100%-os dízel (D100) és 90%-os dízel+10%-os bioetanol (B10) üzemanyagok hatásait vizsgálta részterhelés mellett, 2000 fordulat/perc motorfordulatszám, körülbelül 110 órán keresztül. A dugattyúgyűrűk változásait energiadiszperzív röntgenspektroszkópiával (EDX) és pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgálták. A különböző tüzelőanyag-keverékek égésre gyakorolt hatását az AVL-FIRE programban 2000-es fordulatszám vizsgálták. [8.]



7. ábra: A befecskendezett D100 és B10 tüzelőanyagok különböző hőmérséklet/főtengely pozíció esetén [8.]

Azt tapasztalták a B10-es keverék esetén, hogy az égési csúcshőmérséklet körülbelül 9%-kal lecsökkent az alacsony fűtőérték és a magas párolgási hő miatt. Továbbá mind a nyomás, mind pedig a hőmérséklet csökkent az égésterben, ami kedvező hatással volt a dugattyúgyűrűk kopására. [8.]

## 2.5. Összegzés

A szakirodalom áttekintése során az alternatív tüzelőanyagok kenőanyag degradációra gyakorolt hatásait mutattam be különböző tanulmányokon keresztül. A kísérletekhez alkalmazott eszközök és szabványok bemutatása lehetőséget adott az önálló kísérletek megtervezéséhez is. A vizsgált témakör kutatásai főként a dízelüzemű járművek vizsgálatára terjedtek ki. Úgy gondolom, hogy a szintetikus tüzelőanyag és benzinüzemanyag különböző keverési arányának vizsgálata hiánypótló lenne ezen a területen. A cél nem csak a károsanyag-kibocsátásának és kenőanyag degradációjának vizsgálata lenne, hanem a dugattyúgyűrű és hengerfal közötti súrlódási veszteségek csökkentésével a motor hatásfokának javítása is. A tanulmányokban bemutatott kísérletek megtervezéséhez azonban a kutatók nem használták az ismert módszertanok egyikét sem. A tribológia tágabb területein – amelyek nem specializálódtak az alternatív tüzelőanyagokra – a Taguchi módszert alkalmazzák leggyakrabban, amely meglátásom szerint kevésbé hatékony eljárás, mint a faktoriális módszerek.

### 3. A kísérlettervezés módszertana

Egy rendszer tulajdonságainak felderítése kísérletek futtatásával végezhető el. A cél az, hogy a lehető legkevesebb mérésből, kísérletből a lehető legtöbb információ derüljön ki. Ehhez azonban elengedhetetlen a kísérlettervezésben alkalmazott módszertanok használata. Mindegyik rendszer különböző megközelítést igényel a változók típusából és számából kiindulva, így rendszertől függő, hogy melyik módszertan a leghasznosabb. A mérések számának minimalizálása viszont hatással lehet a kapott modell pontosságára, ami arra készteti a kutatókat, hogy kompromisszumot kössenek e két feltétel között. Gyakori példa erre tribológiai területen is alkalmazott Taguchi módszer. Ezzel az eljárással kevesebb kísérletet kell futtatni, de pontatlanabb is, mint a faktoriális módszerek. [9.]

A tervezés első lépéseként meghatározásra kerülnek a kísérlet paraméterei, melyek közül a rendszer változói a legfontosabbak. Minél több változó kerül feltérképezésre annál pontosabb lesz a kapott modell, mivel több információ áll rendelkezésre a rendszerről. Ezenkívül a kísérletnek mindig van egy bizonyításra váró tárgya és egy kimeneti eredménye. Ezen két elemből határozható meg a kísérlet célkitűzése. A tervezés során a változók értékeinek meghatározása az extrém paraméterek elkerülésével történik. A kísérlettervezés során kapott modell pontatlansága abból is származhat, ha egyszerre csak egy változó kerül módosításra. Ilyen például a két változós kísérlettervezés esetén mindössze három kísérlet futtatása, amely változónként egy információt jelent eredményként. A negyedik kísérlet beiktatásával megduplázódik az információk mennyisége, ami pontosabb becslést tesz lehetővé. [10.]

A kísérlettervezés és modellfelépítés kis mennyiségű változó és mérés esetén kézi számítással is történhet, több változónál viszont egyszerűbb egy erre a célra alkalmas szoftver használata. A kézi és szoftveres levezetés első lépése egy olyan táblázat felrajzolása, ami tartalmazza a kódolt változókat, az eredményeket és a tényleges mérési sorrendet, amely minden esetben véletlenszerű. A valós változók kódolt értékekre való átváltásával könnyebb elvégezni a matematikai műveleteket és összehangolhatóvá válnak a numerikus és kategorikus értékek. Két változó esetén, amennyiben mind a kettő minimum és maximum értékkel rendelkezik a kódolt változók az alábbi táblázatban leírtak szerint alakulnak. [10.]

A kódolt változók és a kapott eredmények alapján felírható a modellt meghatározó egyenlet, ami becslést adhat a további kísérletek valós eredményeiről. Az egyenlet felírásának bemutatása a szakirodalomból vett példa alapján az alábbi táblázatban szereplő adatokkal történik. A kísérlet célja, hogy a sütési idő és a kukorica típusának változtatása maximalizálja a kipattogott kukorica mennyiségét. [10.]

| Sorrend | Véletlenszerű sorrend | „A” változó (Sütési idő) | „B” változó (Kukorica típus) | Eredmény |
|---------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|----------|
| 1.      | 2.                    | -1 (160 mp)              | -1 (fehér)                   | 52 (db)  |
| 2.      | 4.                    | +1 (200 mp)              | -1 (fehér)                   | 74 (db)  |
| 3.      | 1.                    | -1 (160 mp)              | +1 (sárga)                   | 62 (db)  |
| 4.      | 3.                    | +1 (200 mp)              | +1 (sárga)                   | 80 (db)  |

1. táblázat: Kísérleti paraméterek (forrás: [10.], szerzői módosítással)

Az előrejelző modell első tagja az alapvonal, melynek meghatározása az eredmények átlagolásával történik. Ebben az esetben ez az érték 67. Az egyenlet további részében a változók hatásainak leírása következik. A sütési idő hatását mind a fehér, mind pedig a sárga típusú kukorica esetében figyelembe kell venni. Fehér típus esetén, ha az idő 160 másodpercről 200 másodperce emelkedik, akkor 22 darab kukoricával növekedik a kipattogott kukoricák száma. Sárga típus esetén ez az érték 18. Átlagosan tehát a kipattogott kukoricák számát a sütési idő változtatása 160 másodpercről 200 másodpercre 20 darabbal megnövelte. Ez azonban kódolt értékekben két szintet jelent a -1-ről a +1-re, így ha egy szint hatásának a vizsgálata a cél, akkor ezt az értéket meg kell felezni. A sütési idő hatását leíró érték ennek megfelelően 10. A típus megváltoztatásának hatását ugyanezen módon lehet kiszámítani, amely érték ebben az esetben 4. Az egyenlet tehát az alábbiak szerint írható fel:

$$y = 67 + 10(x_A) + 4(x_B). [10.]$$

Az egyenlet pontosságát ellenőrzés útján lehet megerősíteni. Az első mérés adatait és eredményét felhasználva a következő egyenlet írható fel:

$$y = 67 + 10 \times (-1) + 4 \times (+1) = 63. [10.]$$

A felírt egyenlet jó közelítést ad a valós értékekhez, mivel ennek a mérésnek a tényleges eredménye 62 darab kipattogott kukorica volt. Mivel a kísérlet célja a kipattogott kukoricák mennyiségének maximalizálása, az eredményeken jól látszik, hogy a sárga típusú kukorica és a hosszabb sütési idő kombinációjával érhető el a legjobb eredmény. A maximum értékről egyelőre nincs információ, viszont ez a módszer előrejelzést adott arról, hogy milyen irányban érdemes folytatni a kísérlettervezést. A bemutatott módszer a rendszer linearitását feltételezi, azaz nem számol a két változó kölcsönhatásával, ebből adódóan mutathat eltérést a valóságtól. Továbbá a sütési idő végtelenségig való növelése nem eredményez arányosan több pattogatott kukoricát, tehát a rendszer korlátokkal rendelkezik. [10.]

## 4. A kísérlet során alkalmazott módszerek és eszközök

Ez a dolgozat három különböző alacsony viszkozitású kenőolaj tribométeres és felületanalitikai vizsgálatát foglalja magában. A súrlódási és kopási kísérletek Optimol SRV®5 tribométerrel valósultak meg golyó-tárcsa elrendezés és folyamatos olajkeringtetés mellett. A mérés során keletkező súrlódási együtthatók nagysebességű adatrögzítéssel lettek exportálva. A kopásnyomok vizsgálata Keyence VHX-1000 típusú digitális mikroszkóppal és Leica DCM 3D konfokális mikroszkóppal történt. A három olaj viszkozitásának és sűrűségének mérése a kísérlettervezésben meghatározott öt különböző hőmérsékleten Anton Paar SVM 3001 típusú viszkoziméterrel lett végrehajtva. Az olajok összetevő elemeinek, spektrumának meghatározására Bruker INVENIO-S típusú Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia állt rendelkezésre.

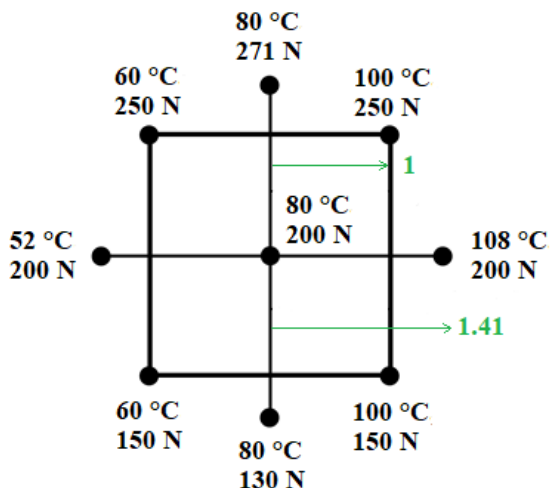
A tribométeres és felületanalitikai vizsgálatok eredményeinek szemléltetése az R szoftver segítségével valósult meg. A program lehetővé tette egy empirikus, másodfokú modell felépítését, aminek előrejelzései megalapozták a későbbi kísérletek irányát, mind a súrlódási együttható, mind pedig az átlagos kopásátmérő csökkentése felé.

### 4.1. Kísérlettervezés (DOE)

A tribométeres kísérlet tervezésének alapja az ISO 19291 szabvány volt [11.], amely meghatározta a méréshez szükséges próbatestek típusát és a kiinduló paramétereket. A kísérletek 10 mm átmérőjű 100Cr6 ötvözetből készült golyóval, illetve 24 mm átmérőjű és 7.9 mm magasságú 100Cr6 ötvözetből készült tárcsával valósultak meg. A szabványban meghatározott 80 °C hőmérséklet és a gyakorlatban alkalmazott 200 N terhelés képezte a kísérlettervezés alapját, mivel a szabványban meghatározott 300 N a készre formulázott friss olajok számára van előírva. A rendszer többi eleme állandó értéként lett definiálva.

Az előző fejezetben bemutatott módszertannal ellentétben, ebben az esetben nem két szinten történt a változók – azaz a hőmérséklet és a terhelés – módosítása. Továbbá a két változó kölcsönhatását feltételezve a nem-lineáris modell leírására alkalmas egyenlet két másodfokú taggal is bővült. Ebben az esetben a szakirodalomban található úgynevezett „central circumscribed” módszertan bizonyult megfelelőnek a rendszer meghatározásához. A módszer két változó esetén három kísérlet segítségével megállapítja a mérés megismételhetőségét a rendszer középpontjában. Ezt követően egy egységnyire a középponttól futtat méréseket mind a négy irányban, végül pedig 1.41 egységnyire a tengelypontokon is. Az 1.41 érték a következő mérnöki gyakorlatban gyakran alkalmazott összefüggésből adódik:  $4^{0.25}=1.41$ . A mérés

középpontjának meghatározása után a tartomány kijelölése következett a középponti értékek megfelelésével, ami így 40 °C és 100 N lett. Ebből következett, hogy hőmérséklet esetén egy szint 20 °C, terhelés esetén pedig 50 N különbséget jelentett. A saját kísérlettervezéshez kapcsolódó „central circumscribed” módszer az alábbi ábrán látható módon épült fel. [10.]



8. ábra: „Central circumscribed” modell

A kísérlettervezés módszertana című fejezetben leírtaknak megfelelően táblázatos összefoglaló készült a kísérlet paramétereiről. A kódolt értékek egyértelmű megjelenítése a későbbi szoftveres elemzéshez nyújtott segítséget. Ezenkívül a mérések véletlenszerű sorrendben lettek elvégezve, amit a táblázat is ábrázol.

| Kísérlet | Sorrend | Hőmérséklet (T) | Terhelés (F) | Kísérleti paraméterek |
|----------|---------|-----------------|--------------|-----------------------|
| 1.       | 6.      | -1              | -1           | 60 °C, 150 N          |
| 2.       | 8.      | 1               | -1           | 100 °C, 150 N         |
| 3.       | 2.      | -1              | 1            | 60 °C, 250 N          |
| 4.       | 7.      | 1               | 1            | 100 °C, 250 N         |
| 5.       | 9.      | 0               | 0            | 80 °C, 200 N          |
| 6.       | 4.      | 0               | 0            | 80 °C, 200 N          |
| 7.       | 1.      | 0               | 0            | 80 °C, 200 N          |
| 8.       | 5.      | -1.41           | 0            | 52 °C, 200 N          |
| 9.       | 11.     | 0               | -1.41        | 80 °C, 130 N          |
| 10.      | 3.      | 1.41            | 0            | 108 °C, 200 N         |
| 11.      | 10.     | 0               | 1.41         | 80 °C, 271 N          |

2. táblázat: Saját kísérlet paramétereit

## 4.2. Optimol SRV®5 tribométer

A mérési sorozat meghatározása után a próbatestek ultrahangos fürdőben történő tisztítása következett. Az eljárás féktisztító felhasználásával 50 °C hőmérsékleten, 15 percen keresztül történt. Az előkészítés során a próbatest felületén található szemcse, zsiradék a kavitációs jelenségnek köszönhetően levált a felszínről, így nem befolyásolta a későbbi kísérlet eredményeit. A próbatestek előkészítését a tribométeres kísérlet összeállítása követte.

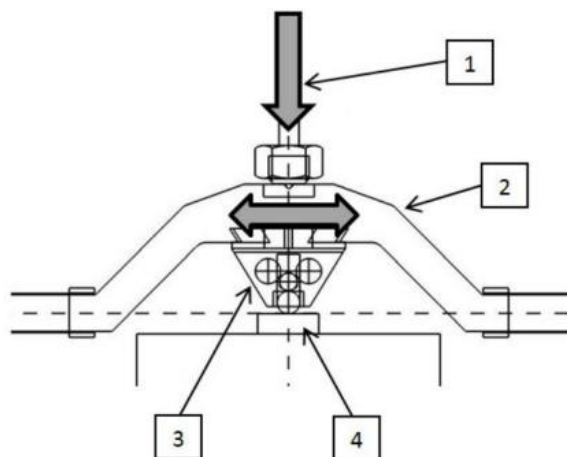
Az alkalmazott berendezés egy golyó-tárcsa elrendezésű Optimol SRV®5 típusú oszcillációs tribométer volt, ami az alábbi ábrán látható:



9. ábra: Optimol SRV®5 tribométer [12.]

Ez az eszköz a kialakításának köszönhetően számos más típusú elrendezésben képes különböző szabványok alapján előírt tribológiai mérések lefolytatására. Az tesztkamrán kívül elhelyezett olajpumpa pedig lehetővé teszi a köztes közeg jelenlétével vagy anélkül futó méréseket. A tesztkamrában elhelyezett fűtőszál segítségével 150 °C hőmérsékletig fűthető a keringtetett kenőanyag. Speciális igényű mérések elvégzését teszi lehetővé továbbá a tesztkamra 90°-os megdöntése, illetve az extrém légköri környezet megteremtése is. A tribométer frekvencia tartománya 1-500 Hz között, míg a lökethossz 0,01-5 mm között állítható szoftveresen. A tribométer felső részén található a rugós terhelési modul, ami a próbatestre adja az előre meghatározott terhelési erőt a terhelő rúdon keresztül (1). A terhelési erő nagyságának függvényében két különböző kazetta és oszcillációs keret (2) áll rendelkezésre: 200 N és 2000 N normálerővel hitelesített. 200 N feletti terhelés alkalmazása esetén a gép károsodását elkerülendő, mindig a 2000 N normálerővel hitelesített kazettát és keretet kell felszerelni.

Emellett pedig oda kell figyelni arra is, hogy az egymással kompatibilis kazetta és keret kerüljön beszerelésre. Az alábbi ábra a saját kísérletben is alkalmazott elrendezést mutatja be a golyó (3) és a tárcsa rögzítésére (4) alkalmazott befogókkal. A keringtetett kenőanyag fűtésén kívül, a tárcsa befogóját rögzítő modul hőmérséklete is szabályozható. [12.] [13.]



10. ábra: Oszcillációs modul [13.]

A próbatestek egyszerű beszerelését követően a tribométer szoftveres beállítása következett. A szoftver lehetővé teszi különböző, előre megírt programok tárolását, ami lerövidíti az azonos mérések elindításának idejét. A programban a mozgás típusa mellett többek között a kenőanyag és a próbatest tartó hőmérséklete, a frekvencia, a lökethossz, az olajpumpa sebessége, a kísérlet időtartama és a terhelés nagysága is módosítható. A rendszervezérlésen kívül, lehetőség van a kísérlet teljes időtartama alatt valós időben ellenőrizni és rögzíteni a hőmérsékletet, terhelést és súrlódási együtthatót. A szoftver két lehetőséget kínál a súrlódási együttható rögzítésére: az egyik módszer egy másodpercre átlagolva (SRA), míg a másik a löket mentén rögzíti. Ez utóbbit nagysebességű adatrögzítésnek (HRA) nevezik. [12.] [13.]

A saját kísérlet megtervezése során az alábbi paraméterek kerültek rögzítésre a mérési sorozat teljes időtartamára:

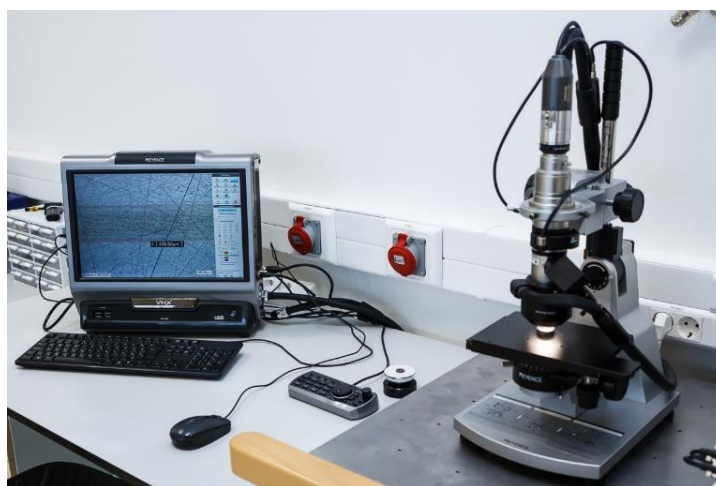
- frekvencia: 50 Hz,
- lökethossz: 1 mm,
- előterhelés: 50 N,
- olajpumpa sebesség: 30%,
- mérés időtartama: 60 perc,
- nagysebességű adatrögzítés.

Mindegyik kísérlet esetében változik a hőmérséklet és a terhelés, így kilenc különböző program létrehozására volt szükség tizenegy helyett, mivel a középső pontban (80 °C, 200 N) három mérés történt. Továbbá a korábbi tapasztalatokra hagyatkozva a kísérlet 60 perces időtartama alatt az első öt perc, az az a bejáratási szakasz mindig 50 N előterheléssel futott. Az első öt percet követően teljes terhelés alatt futott a kísérlet a fennmaradó 55 percben.

#### 4.3. Keyence VHX-1000 digitális mikroszkóp

A tribométeres kísérletet követően a próbatestek felületanalitikai vizsgálata következett, melynek első lépése a tárcsán és a golyón lévő kopásnyomok hosszának és szélességének meghatározása volt. Az alkalmazott eszköz egy Keyence VHX-1000 típusú digitális optikai mikroszkóp volt, amit a hagyományos optikai fénymikroszkópok hiányosságainak kiküszöbölésére alkottak meg. Az integrált CCD-kamerának és optikának köszönhetően éles fókuszú és nagy mélységélességű képek készítését teszi lehetővé. A felületi struktúrák részletes vizsgálatában segítséget nyújt az állítható állvány, a különböző nagyítású objektívek és a világítás optimalizálása. A mikroszkóp szoftverébe integrált dokumentáció készítővel gyorsan és egyszerűen lehet szerkeszteni a képet. A digitális mikroszkóp előnye, hogy valós időben történő kép összefűzésre is képes, így a különböző mélységben lévő felületek is fókuszba kerülhetnek végeredményben. [14.]

A kopásnyomok vizsgálata a VH-Z100R objektívvel történt, a tárcsák esetében 100x-os, a golyók esetében pedig 200x-os nagyítás mellett.



11. ábra:Keyence VHX 1000 digitális mikroszkóp [14.]

#### 4.4. Leica DCM3D konfokális mikroszkóp

Az kopásnyomok átlagos átmérőjének meghatározása után a kopástérfogat vizsgálata következett, Leica DCM3D konfokális mikroszkóp segítségével. A konfokális mikroszkópok felépítése hasonló az optikai mikroszkópokéhoz, viszont a kontaktprofilos módszerrel ellentétben pontosabb mérést tesznek lehetővé azért, hogy a teljes felületet mérik. Továbbá a teljes minta megvilágítása helyett a lézerfényt egy meghatározott mélységben lévő pontra fókuszálják, így csak az ebből a pontból származó jelek jutnak be a detektorba. [15.]

A vizsgálni kívánt minta típusától függően különböző objektívek érhetőek el: 10x, 20x, 50x és 100x-os nagyítással. A minta könnyű navigálásához X és Y irányban is mozgatható a mintatartó asztal, míg a Z irányú mozgást a mikroszkóp végzi el. A megfelelő minőségű és élességű képek elkészítéséhez elengedhetetlen lépés a próbatestek síkolása, ami a goniométer állításával valósulhat meg. A mikroszkóphoz tartozó szoftverrel lehetőség van panoráma felvételek, előre meghatározott pontokban lévő mérési sorozatok készítésére is.

A próbatestek kopásnyomairól készített panoráma felvételek a golyó és a tárcsa esetében is 20x-os nagyítású objektívvel készültek. A képek összefűzését 20%-os átfedés mellett végezte el a szoftver. A minták kiértékelése a Leica Map nevezetű szoftverben valósult meg.



12. ábra: Leica DCM3D konfokális mikroszkóp [16.]

#### 4.5. Viskoziméter

A próbatestek felületanalitikai vizsgálatán kívül a három különböző, alacsony viszkozitású kenőolaj fizikai-kémiai tulajdonságainak mérésére is szükség volt. A kinematikai viszkozitás és a sűrűség megállapítása egy Anton Paar SVM 3001 típusú viszkoziméter segítségével valósult meg. Működési elve hasonlít a Couette-módhoz, felépítését tekintve pedig egy viszkozitásmérő és egy sűrűségmérő cellával is rendelkezik. A viszkozitást mérő cellában lévő

mintafolyadékot tartalmazó cső állandó sebességgel forog, míg a mérőrotor szabadon úszik a mintában. A fellépő nyírőerő hatására a beépített mágnessel ellátott rotor forogni kezd és röviddel a mérés kezdete után eléri az egyensúlyi sebességet. Ez adja meg a folyadék dinamikai viszkozitását. A kinematikai viszkozitás számítását az eszköz automatikusan elvégzi a dinamikai viszkozitás és a sűrűség függvényében. A viszkoziméter megfelelő működéséhez nagy hangsúlyt kell fektetni a toluollal történő szakszerű tisztítására. [17.]

A három kenőolaj viszkozitásának és sűrűségének mérése a kísérlettervezésben meghatározott öt különböző hőmérsékleten (52 °C, 60 °C, 80°C, 100 °C, 108 °C) valósult meg.



13. ábra: Anton Paar SVM 3001 viszkóziméter [17.]

#### 4.6. Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR)

A kenőolaj spektrumvizsgálatának fókuszában a kopásgátló adalék és az oxidáció állt. Az elemzéshez alkalmazott eszköz egy Bruker INVENIO-S típusú Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia volt, amely két különböző mérési csatornával rendelkezik: Platinum ATR-rel és Transmission csatornával.

Az infravörös spektroszkópiában az abszorbancia a hullámszám függvényében kerül ábrázolásra, aminek mértékegysége  $\text{cm}^{-1}$ , így a hullámszám egyenesen arányos az elnyelt energiával. Az analitikai méréseket a közép-infravörös tartományban,  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  hullámszám környékén szokták elvégezni. Folyadékok mérése esetén olyan szerves oldószert, illetve mintatartó küvetát kell alkalmazni, amelyek az adott tartományban áteresztők, így nem befolyásolják a mérési eredményt. A tényleges mérés elindítása előtt, minden esetben el kell végezni egy háttérmerést is, mivel ezek az eszközök általában egy fényutasok. [18.]

A három különböző kenőolaj összetételének elemzésére tribométeres járatás előtt és után is sor került. A két spektrum összehasonlítása információt adott arról, hogy a kenőolaj 11 darab 60 perces mérés alatt mennyit változott összetételében. A saját mérések először a Transmission csatornában lettek elvégezve kálium-bromid kűvetta alkalmazásával, majd ellenőrzésként a Platinum ATR mérési csatornában is. A tisztításhoz hexán lett felhasználva, a spektrumok kiértékelése pedig az ASTM E2412-10 (2018) szabvány segítségével történt. [19.]



14. ábra: Bruker INVENIO S Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia [20.]

## 5. Kísérleti eredmények

Jelen kutatás célja az alternatív tüzelőanyaggal szennyezett 0W20 viszkozitású kenőolaj fizikai-kémiai tulajdonságainak megállapítása és összehasonlítása volt egy referencia és egy mesterségesen öregített, 0W20 viszkozitású kenőolaj tulajdonságaival. A kedvező súrlódási és kopási értékek prognosztizálásán kívül a kutatás során alkalmazott kísérlettervezési módszertan egy olyan másodfokú modell megalkotását is előre vetítette, amely nagymértékben illeszkedik a valós értékekhez. A minimális mennyiségű kísérletet igénylő előrejelző modell segítségével könnyen megállapíthatóvá válik, hogy hol várható majd a legalacsonyabb súrlódási együttható, vagy a legkisebb átlagos kopásátmérő, ami jelentősen leredukálja a kísérletek számát.

A másodfokú modell megalkotásához a tribométeres mérésekből származó súrlódási együttható és a golyó próbatestek felületanalitikai elemzéséből származó átlagos kopásátmérő került felhasználásra. Továbbá a kutatás magában foglalja a tárcsák kopástérfogatának, illetve a kenőolajok spektrumának és viszkozitásának vizsgálatát.

Az összehasonlíthatóság érdekében mindegyik kenőolaj 0W20 viszkozítású, továbbá a mesterségesen öregített kenőolajnak és a motorfékpadi használatból vett 20% etanol-tartalmú benzinüzemanyaggal szennyezett kenőolajnak is a referencia olaj volt az alapja. Ez a referencia olaj egy friss, kereskedelmi forgalomban kapható, Shell márkájú, készre formulázott olaj volt. A mesterségesen öregített olaj 97 órán keresztül termo-oxidatív eljárással készült RON95 benzinüzemanyag hozzáadásával. Az etanollal szennyezett olaj motorfékpadi alkalmazásból származott. A mintavételezés egy EA888 típusú motorból 10,29 óra járatás után valósult meg.

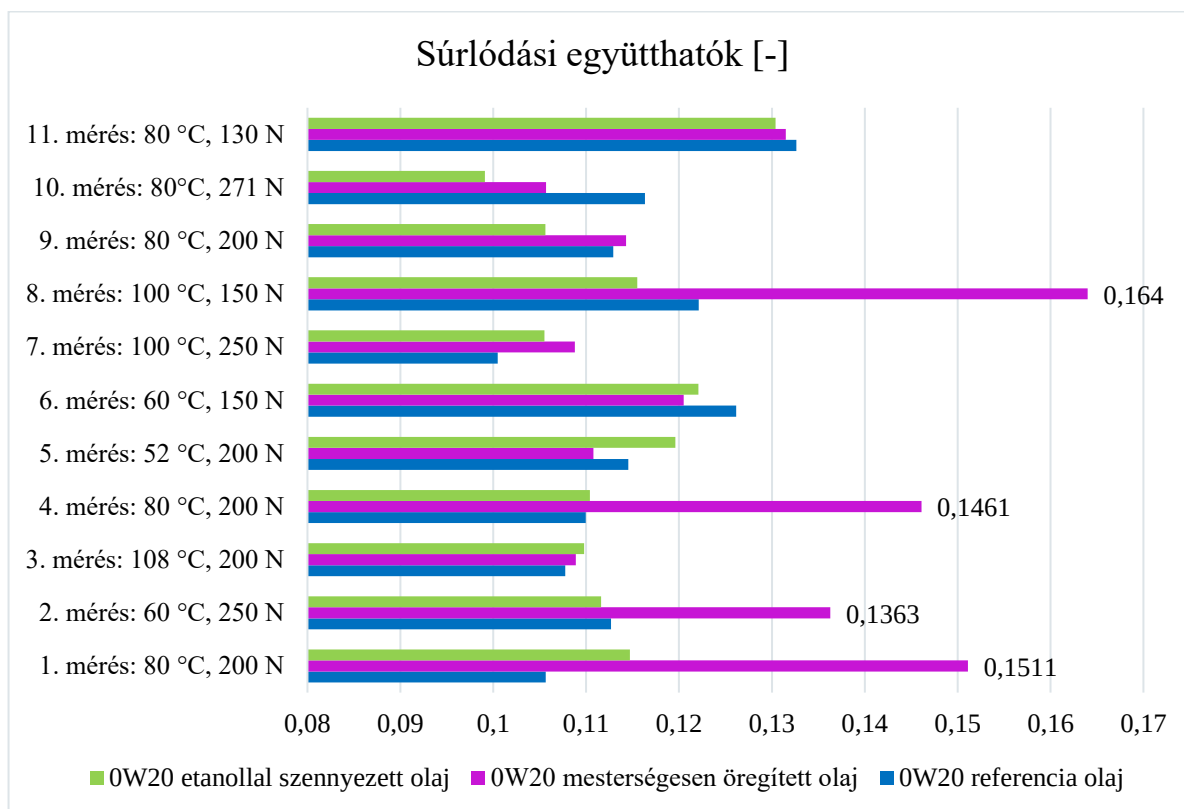
### 5.1. Súrlódási együttható vizsgálata (COF)

Az Optimol SRV®5 tribométerrel végzett kísérletek próbatestek között fellépő súrlódási együtthatói nagysebességű adatrögzítéssel kerültek összegzésre egy Excel-táblázatban. Mivel ez a típusú adatrögzítés a löket mentén figyeli a súrlódási együtthatót, így hatalmas mennyiségű adat halmozódik fel a 60 perces mérés alatt. Ez a 60 perc ráadásul tartalmazza a bejáratási szakaszt is, ahol a súrlódási együttható akár a kétszerese is lehet a mérés közepén mért értékeknek, ami jelentős mértékben befolyásolhatja a végeredményt. Ezt a tényt és a korábbi gyakorlatokat figyelembe véve a súrlódási együtthatók elemzése 30 percnél és 60 percnél történt meg – mind a két esetben 5 percnyi és 5 másodpercnyi tartományban. Ezek átlagolt értékeit összehasonlítva nem volt szembetűnő eltérés a különböző időpontok között, mint ahogy ez az alábbi táblázatban is látszik a referencia kenőolajjal végzett első mérés esetében:

| 0W20 Ref. olaj | 30. perc (5mp) | 30. perc (5p) | 60. perc (5mp) | 60. perc (5p) |
|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| 1. mérés       | 0.1057         | 0.1093        | 0.1064         | 0.1063        |

3. táblázat: Az elemzett súrlódási együtthatók átlagának összehasonlítása

Az elhanyagolható különbség miatt a későbbi másodfokú modell felépítéséhez 5 másodpercnyi adat került átlagolásra fél óránál, mindegyik kenőolaj esetében. Az ebből származó súrlódási együtthatók átlagos értékeit az alábbi diagram szemlélteti:



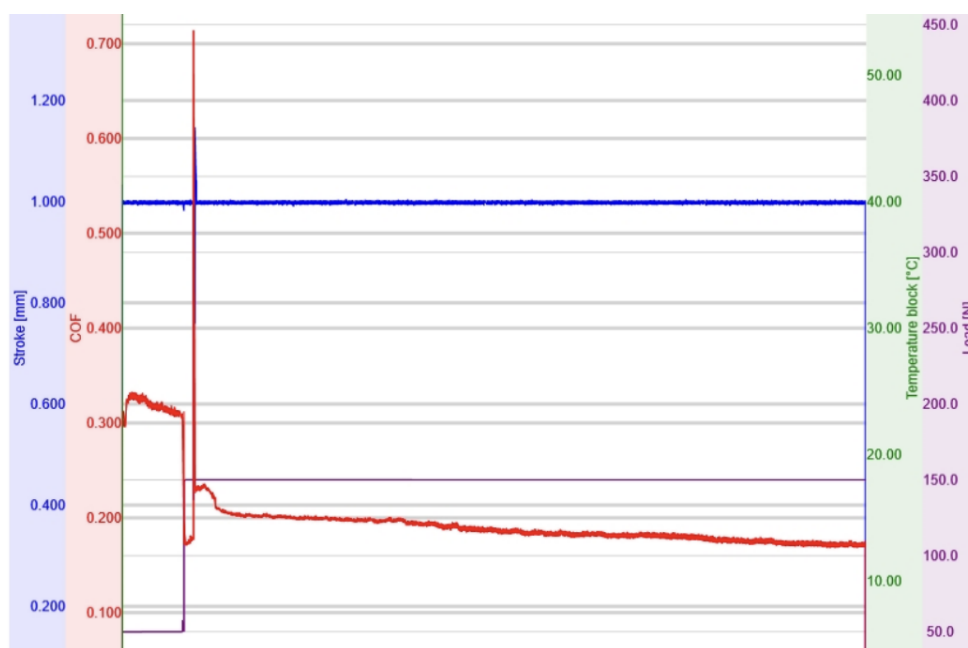
16. ábra: Súrlódási együtthatók (COF)

A mérési pontonként összehasonlított súrlódási együtthatók alapján az alternatív tüzelőanyaggal szennyezett kenőolaj és a referencia kenőolaj hasonló tulajdonságokat mutat. Az etanollal szennyezett kenőolaj a motorfékpadi alkalmazása miatt nem minősül friss olajnak, mint a referencia olaj. Ennek ellenére ez a használt olaj az esetek majdnem felében jobban is teljesített, mint a friss olaj. Az utolsó mérésnél (80 °C, 130 N) az alacsony terhelési érték ellenére azonban mind a három olaj az átlagosnál nagyobb súrlódási együtthatót produkált, ami a próbatestek között létrejövő hidrodinamikus folyadékrétegben ébredő belső súrlódásnak köszönhető. A mesterségesen öregített olaj kiugró értékeit vizsgálva nem lehet egyértelműen megállapítani, hogy a hőmérséklet vagy a terhelés nagysága befolyásolja-e ilyen mértékben az eredményeket. Ebben az esetben jogosan merül fel a kérdés, hogy a két változó egymásra

gyakorolt kölcsönhatása játszik-e szerepet a súrlódási együttható alakulásában? A kísérlettervezésben meghatározott másodfokú modell létrehozása nem csak a további kísérletek irányának kijelölésében mérvadó, hanem abban is, hogy megmutassa, melyik változó – vagy épp azok kölcsönhatása – gyakorol nagyobb hatást az eredményekre.

A mesterségesen öregített kenőolaj nem csak az átlagos súrlódási együttható nagyságában mutatott jelentős különbséget a többi olajhoz képest. A termo-oxidatív öregítés nagymértékben rontotta az olaj általános fizikai-kémiai tulajdonságait, ami a tribométeres kísérlet során úgynevezett berágódáshoz vezetett. Az 50 N terhelés mellett futó bejáratási szakasz minden olajnál magas súrlódási együttható értékekkel indult, ami azonban a terhelés-ráadást követően lecsökkent. A mesterségesen öregített olajnál viszont a visszaesést követően egy hirtelen kiugrás figyelhető meg, ami maximum egy másodpercig tartott. A tárcsa kopásnyomából ítélve abban az időpillanatban egy, a tárcsa anyagából kiszakadt anyagrészecske fáradásos kopást idézett elő a tárcsa felületén, ami ezt követően az olajkeringtetés hatására kiszabadult az érintkező felületek közül. Ennek megfelelően, ahogy az alábbi ábra is mutatja, a súrlódási együttható a kiugró érték után lassan beállt egy alacsonyabb értékre, amit a mérés végéig megtartott. Ezzel a mérés első öt percében létrehozott felület helyén egy teljesen új kopásnyom alakult ki, mintha a mérés csak abban az időpillanatban indult volna el.

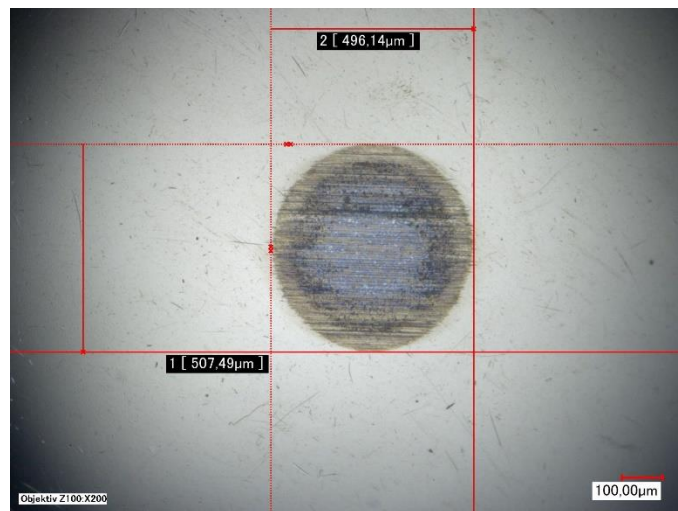
Az imént felsorolt okok miatt a mesterségesen öregített kenőolajjal végzett kísérletek eredményeiből létrehozott másodfokú modell várhatóan drasztikus eltérést mutat majd a másik két olaj eredményeiből készült modellhez képest.



17. ábra: Súrlódási együttható (piros) alakulása a 8. mérés esetében (100 °C, 150 N)

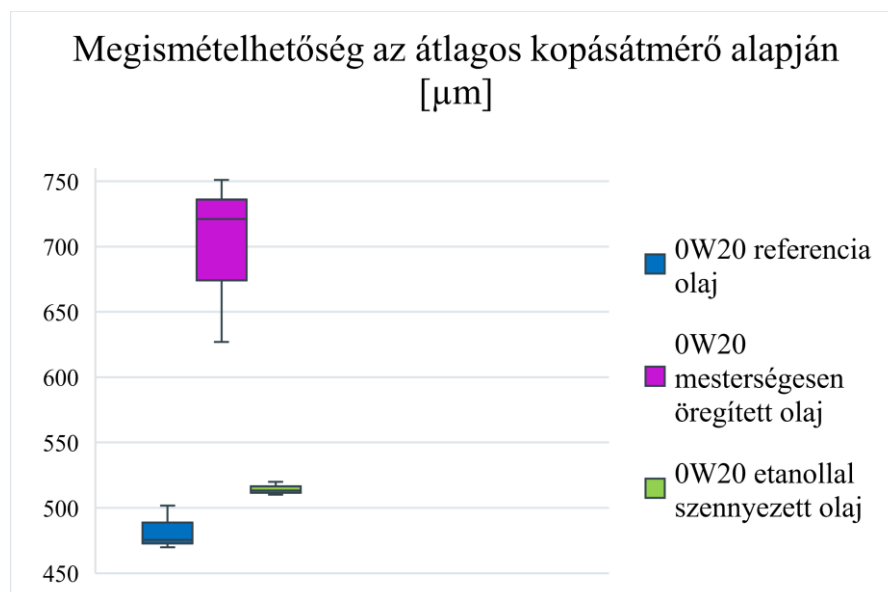
## 5.2. Átlagos kopásátmérő vizsgálata (AWSĐ)

A próbatestek felületanalitikai vizsgálata az ultrahangos fürdőben történő tisztítást követően valósult meg. A Keyence VHX-1000 digitális, optikai mikroszkóp szoftvere lehetővé tette a kopásnyomokról készült képek méretezését. A kopásnyomok szélességének és hosszának átlagából került kiszámításra az átlagos kopásátmérő (AWSĐ) ami a kopásnyomok egyik jellemző mérőszáma. A korábbi gyakorlatoknak megfelelően a golyó átlagos kopásátmérőjének értéke jelen esetben is elég információt ad a próbatestek érintkező felületeinek kopási tulajdonságairól a másodfokú modell felépítéséhez.



18. ábra: *N09\_1* golyó kopásnyoma méretezve

A következő ábra a középső pontban történő mérések megismételhetőségét illusztrálja szórás segítségével az átlagos kopásátmérő függvényében:

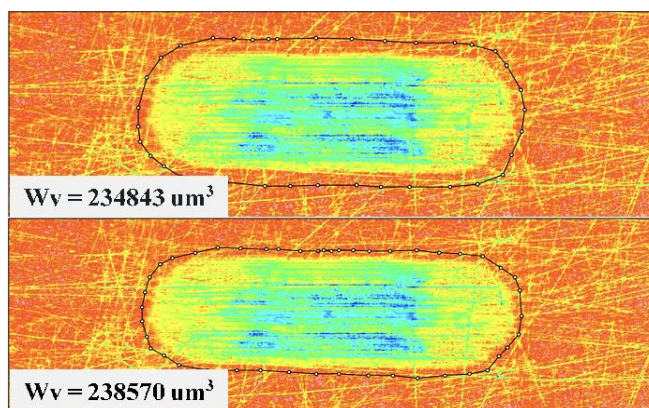


19. ábra: *Mérés megismételhetőségének ellenőrzése a középső (80°C, 200 N) pontban szórás kimutatásával*

A kísérlettervezésben bemutatott „central circumscribed” módszertan alapján a középső pontban három mérés került megismétlésre. A három mérés eredménye arról ad információt, hogy az adott paraméterekkel történő mérés megismételhető-e úgy, hogy ugyanazokat, vagy hasonló értéket eredményezzen. Abban az esetben, ha a mérés eredményei szignifikáns eltérést mutatnak egymástól, úgy az eredményekre illesztett másodfokú modell előrejelzései pontatlanok lesznek. A fenti ábra az átlagos kopásátmérőit mutatja középső pontban (80 °C, 200 N) elvégzett három mérésnek. A súrlódási együtthatók alapján várható volt, hogy a mesterségesen öregített kenőolajjal futott mérések nagyobb átlagos kopásátmérőt eredményeznek. Ezenkívül az öregített olajos mérés szórása is jelentősen nagyobb, mint a többi olaj esetében, ami szintén a nagymértékben megváltozott fizikai-kémiai tulajdonságokra vezethető vissza. A súrlódási együtthatók kiugró értékei és a megismételhetőség bizonytalansága előrevetíti az eredményekre illesztett másodfokú modell hiányosságait. Ezzel szemben az alternatív tüzelőanyaggal szennyezett kenőolaj hiába idézett elő nagyobb átlagos kopásátmérőt, mint a referencia olaj, a szórást figyelembe véve egy sokkal pontosabb modell építhető fel az eredményeket felhasználva. A szórás értéke referencia olajnál 17.1  $\mu\text{m}$ , mesterségesen öregített olajnál 64.6  $\mu\text{m}$ , míg az etanollal szennyezett kenőolaj esetében ez az érték egy nagyságrenddel kisebb, 5.01  $\mu\text{m}$  volt.

### 5.3. Kopástérfogat vizsgálata ( $W_v$ )

Az átlagos kopásátmérő vizsgálatát a kopástérfogat elemzése követte Leica DCM3D konfokális mikroszkóp segítségével. Míg az átlagos kopásátmérő meghatározásához a golyó méretei lettek felhasználva, addig a kopástérfogat meghatározása – korábbi gyakorlatoknak megfelelően – tárcsa alapján történt. A tárcsa kopásnyomáról készült felvételek mérete 850  $\mu\text{m}$  x 2.5 mm. A kopástérfogat meghatározása a Leica Map nevű szoftverrel történt az alábbi ábrán látható módon.



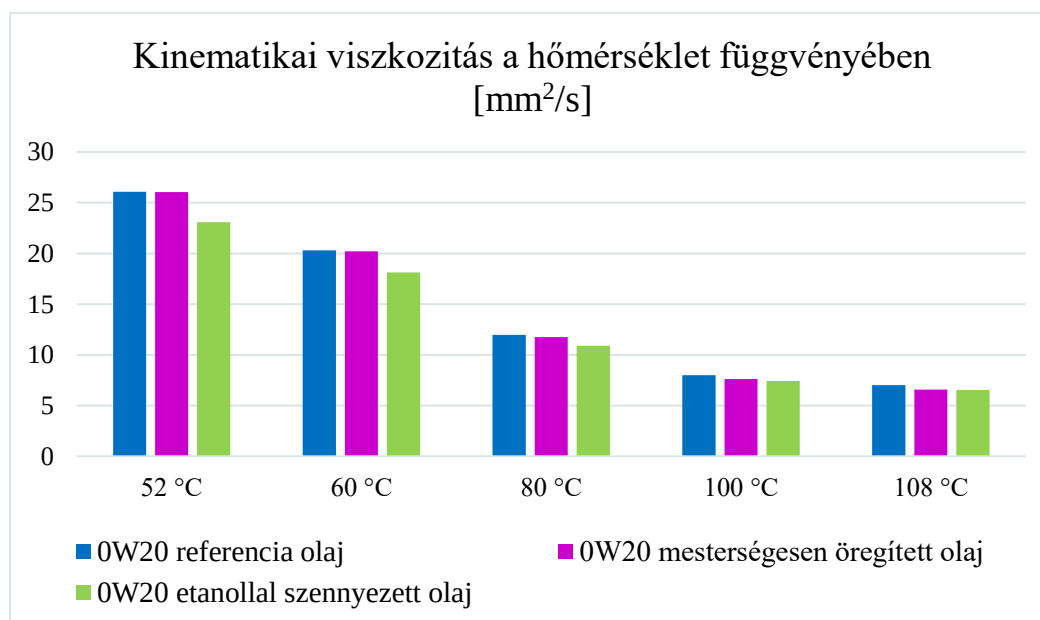
20. ábra: Kopástérfogat meghatározása

Ahogy az ábra is mutatja, a mérnöki gyakorlatban alkalmazott módszer szabadkézi meghatározással jelöli ki a kopásnyom területét, ami jelentősen befolyásolja a kopástérfogat méretét.

Jelen kutatás a kopástérfogati értékeket nem használja fel a másodfokú modell felépítéséhez azok bizonytalansága miatt. A továbbiakban egy olyan módszertan kidolgozása szükséges, ami nem támaszkodik ilyen mértékben a szabadkézi meghatározásra. Ehhez nyújt segítséget az ASTM D7755 – 11 (2017) szabvány [21.], aminek alkalmazását a jelenlegi kutatás nem tartalmazza.

## 5.4. Spektroszkópia és viszkozitás vizsgálata

A próbatestek elemzését követően a három kenőolaj spektrumának és viszkozitásának vizsgálata következett. A kinematikai viszkozitási adatokat az alábbi diagram szemlélteti:

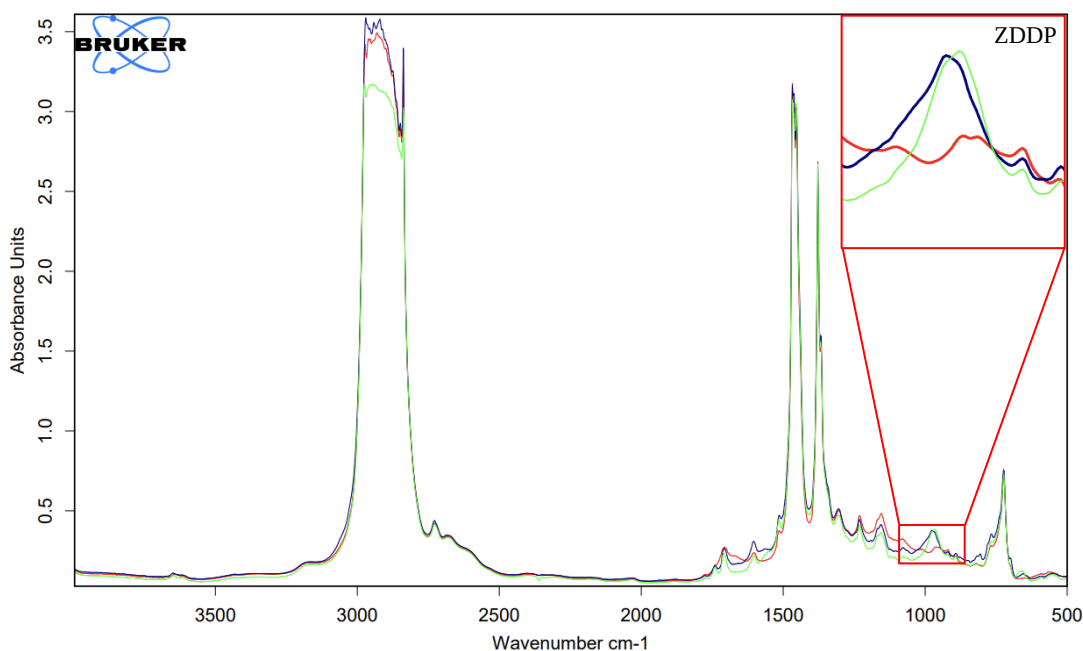


21. ábra: Kinematikai viszkozitás

A friss, referencia olaj kinematikai viszkozitása mindegyik hőmérsékleten magasabb volt a többi olajénál, ami összefüggésbe hozható az átlagos kopásátmérő nagyságával. A magasabb viszkozitású kenőolaj kisebb kopást eredményez az érintkező felületek között létrejövő vastagabb tribofilm miatt. A kinematikai viszkozításon kívül számos kémiai-fizikai tulajdonság játszik szerepet a kopás kialakulásában. Jelen esetben az etanollal szennyezett olaj rendelkezik a legkisebb kinematikai viszkozitással, azonban az átlagos kopásátmérőket figyelembe véve ez az olaj jóval kisebb mértékű kopást eredményez, mint a mesterségesen öregített olaj. Korábbi kísérletek is bizonyították, hogy az etanol csökkenti a kenőolaj viszkozitását, amit a fenti

diagram is alátámaszt. [1.] Alacsony hőmérsékleten jelentős különbség van az értékek között, míg magas hőmérsékleten az etanol párolgásának (78.4 °C) köszönhetően ez a különbség mérséklődik.

A mesterségesen öregített olaj kinematikai viszkozitásának nagysága nem ad magyarázatot sem a kiugró súrlódási együttható értékekre, sem pedig a jelentős méretű átlagos kopásátmérőre. A választ a kenőolaj spektrumvizsgálatában kell keresni Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiával. Ez a módszer nem alkalmas abszolút értékek kimutatására, viszont az olajban található elemek meghatározásával információt kapunk az olajban végbemenő kémiai folyamatokról és azok eredményeiről. Az alábbi ábrán a referencia olaj (zöld), az etanollal szennyezett olaj (kék) és a mesterségesen öregített olaj (piros) spektruma látható. Az  $1000\text{ cm}^{-1}$  körüli tartományban a mesterségesen öregített olaj spektruma szignifikáns eltérést mutat a többihez képest. Ebben a tartományban a kopásgátló adalék, azaz a cink-dialkilditiofoszfát (ZDDP) található, ami az öregített olaj esetében a termo-oxidatív eljárás hatására lebomlott. A kopásgátló adalék kémiai megváltozása magyarázatot ad a megnövekedett átlagos kopásátmérőre, ami ebben a rendszerben egyértelműen a súrlódási együttható emelkedésével járt együtt.

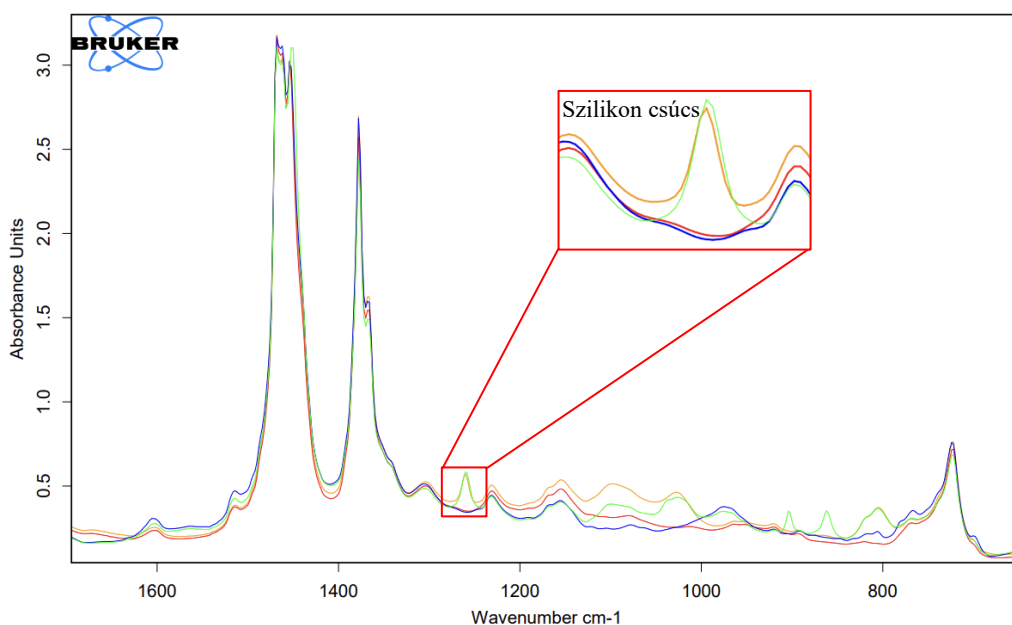


22. ábra: A három kenőolaj spektruma

A mesterségesen öregített olaj esetében alkalmazott termo-oxidatív eljárás jelentősen befolyásolta az olaj tulajdonságait, így felmerülhet a kérdés, hogy a különböző hőmérsékleteken futtatott tribométeres kísérletek hatással voltak-e az olaj tulajdonságaira?

Ennek vizsgálatára tribométeres járatás előtti és utáni minta került összehasonlításra az etanollal szennyezett és a mesterségesen öregített olaj felhasználásával.

Az alábbi ábrán négy spektrum található: a mesterségesen öregített olajé járatás előtt (piros) és utána (sárga), illetve az etanollal szennyezett olajé járatás előtt (kék) és utána (zöld). A spektrumok jól szemléltetik, hogy az olaj tulajdonságaiban nem történt számottevő változás, ami a rövid kísérleti időtartamra és a relatíve alacsony hőmérsékletre vezethető vissza. Az 1260 cm<sup>-1</sup> körüli tartományban viszont egy csúcs jelent meg a tribométeres járatás utáni olajmintákban, ami szilikon jelenlétére utal. A mérések a Platinum ATR csatorna segítségével megismétlésre kerültek a mérésből adódó hiba kizárása érdekében. Miután ezzel a csatornával is kimutatható volt a szilikon jelenléte, egyértelművé vált, hogy a tribométeres kísérlet során kerülhetett az olajba. A kísérletekhez összeállított olajkeringtetés olyan szilikoncsövek segítségével valósult meg, amelyek csak 80 °C-ig hőállóak. A szilikoncsövek nem leválthatók, mivel gyárilag ezt a típust ajánlják és gyártják az Optimol SRV®5 tribométerhez.



23. ábra: Szilikon csúcs az olajspektrumon

## 5.5. Másodfokú modell létrehozása a kísérleti eredmények alapján

A kutatás „Kísérlettervezés (DOE)” című fejezetében bemutatott módszertan alapján a súrlódási együtthatók és az átlagos kopásátmérők kerültek felhasználásra a másodfokú modell felépítéséhez. A rendszer nem-linearitását feltételezve, annak megjelenítéséhez két másodfokú tag került a modellt leíró egyenletbe:

$$y = T \times F + I(T^2) + I(F^2).$$

Az egyenletben található I-vel jelölt tag az egységmátrixnak felel meg, míg a hőmérséklet és a terhelés szorzata a két változó kölcsönhatását vonja be a modell felépítésébe. Az alábbi ábrán a referencia olajhoz tartozó sűrűlási együttható és átlagos kopásátmérő értékekből felépített másodfokú modell programozási lépései láthatóak az R szoftver környezetében: [22.]

```

1  T <- c(-1, +1, -1, +1) # -1 = 60°C, +1 = 100°C
2  F <- c(-1, -1, +1, +1) # -1 = 150N, +1 = 250N
3  y1 <- c(448.2, 471.4, 499.2, 520.9) # AWSd
4  y2 <- c(0.1261, 0.1221, 0.1127, 0.1005) # COF
5
6  T <- c(T, 0, 0, 0)
7  F <- c(F, 0, 0, 0)
8  y1 <- c(y1, 475.5, 501.8, 469.8)
9  y2 <- c(y2, 0.1129, 0.1099, 0.1057)
10
11 T <- c(T, -1.41, 0, +1.41, 0)
12 F <- c(F, 0, -1.41, 0, +1.41)
13 y1 <- c(y1, 485.8, 437.3, 493.6, 598.8)
14 y2 <- c(y2, 0.1145, 0.1326, 0.1078, 0.1163)
15
16 library(pid)
17 awsd_ball <- lm(y1 ~ T*F + I(T^2) + I(F^2))
18 hsa_cof <- lm(y2 ~ T*F + I(T^2) + I(F^2))
19
20
21 summary(awsd_ball)
22 paretoPlot(hsa_cof)
23 paretoPlot(awsd_ball)
24 contourPlot(awsd_ball, "T", "F")
25 contourPlot(hsa_cof, "T", "F")
26 predict(awsd_ball, data.frame(T=2.5, F=1.5))
27 predict(hsa_cof, data.frame(T=2.5, F=1))

```

24. ábra: Programozás az R szoftver környezetében [22.]

A hőmérsékleti és terhelési értékek a kísérlettervezés című fejezetben leírtaknak megfelelően kódolt változókként lettek definiálva, és ezekhez lettek hozzárendelve a sűrűlási együttható és átlagos kopásátmérő értékek. A program lehetővé teszi az egyenletben szereplő együtthatók meghatározását („summary”), egy előre meghatározott pontban lévő eredmény becslését („predict”), továbbá grafikusán ábrázolja a kísérletek jövőbeni irányát („contour plot”) és a változók hatásait a rendszerre („pareto plot”).

### 5.5.1. 0W20 viszkozitású referencia kenőolaj modellje

Az előző fejezetben felírt program futtatásával külön másodfokú modell került meghatározásra a sűrűlási együttható és az átlagos kopásátmérő értékek alapján. Az átlagos kopásátmérő értékekre illeszkedő másodfokú modellt leíró egyenlet a következő:

$$y = 482.442 + 7.008(T) + 41.149(F) - 1.147(T^2) + 13.112(F^2) - 0.375(T \times F).$$

A másodfokú modell pontosságának ellenőrzéséhez a 60 °C (-1) és 150 N (-1) kódolt változói kerültek behelyettesítésre:

$$y = 482.442 + 7.008(-1) + 41.149(-1) - 1.147(-1^2) + 13.112(-1^2) - 0.375(-1 \times -1) = 445.875.$$

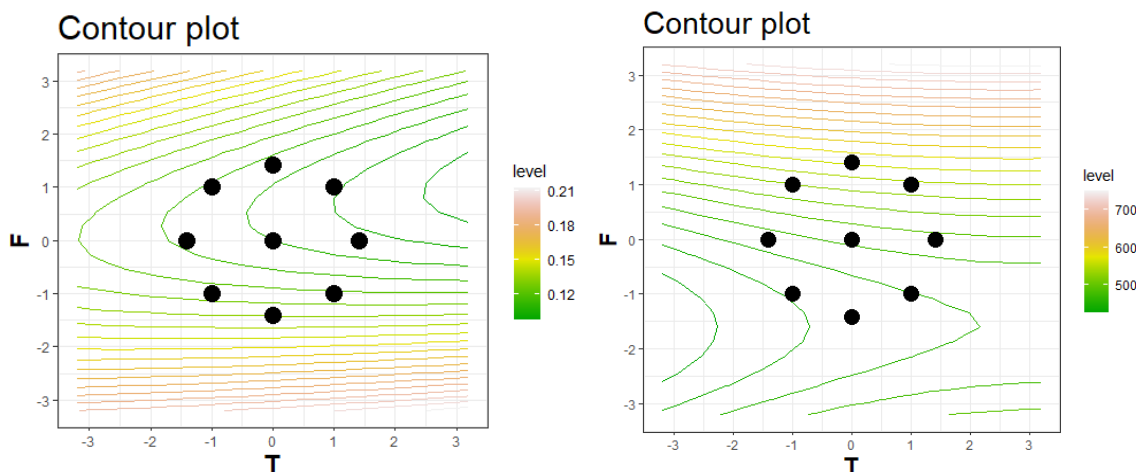
A kísérlet során kapott átlagos kopásátmérő 448.2  $\mu\text{m}$  volt, amit -0.5% eltéréssel közelített a másodfokú modell alapján meghatározott egyenlet. A súrlódási együttható értékekre illeszkedő másodfokú modellt leíró egyenlet a következő:

$$y = 0.1095 - 0.0032(T) - 0.0073(F) + 0.0002(T^2) + 0.0069(F^2) - 0.0021(T \times F).$$

A másodfokú modell pontosságának ellenőrzéséhez jelen esetben is a 60 °C (-1) és 150 N (-1) kódolt változói kerültek behelyettesítésre:

$$y = 0.1095 - 0.0032(-1) - 0.0073(-1) + 0.0002(-1^2) + 0.0069(-1^2) - 0.0021(-1 \times -1) = 0.145.$$

A kísérlet során kapott súrlódási együttható 0.1261 volt, ami 15%-kal tér el a kapott eredménytől. Ebben az esetben a másodfokú közelítés valószínűleg nem elegendő a rendszer leírásához, ennek megfelelően magasabb rendű, vagy nem polinomiális modellt kellene alkalmazni. Ezt a tulajdonságot az alábbi, baloldali ábra is jól szemlélteti. A kontúrvonalak alapján a súrlódási együttható a hőmérséklet folyamatos növelésével azonos terhelés mellett csökkenne, ami ellentmond a gyakorlatnak. Ezzel szemben a jobboldali ábra, ami az átlagos kopástérfogat változását mutatja be, jól szemlélteti, hogy a hőmérséklet és a terhelés csökkentésével egyre kisebb kopásátmérő érhető el.



25. ábra: A referencia olaj másodfokú modelljének ábrázolása baloldalon a súrlódási együtthatóval, jobboldalon az átlagos kopásátmérővel (a modell felállításához használt mérési pontokat fekete kör jelöli)

A változók rendszerre gyakorolt hatását vizsgálva, mind a súrlódási együttható, mind pedig az átlagos kopásátmérő esetében a terhelés befolyásolta legnagyobb mértékben az eredmények alakulását.

### 5.5.2. 0W20 viszkozitású, mesterségesen öregített kenőolaj modellje

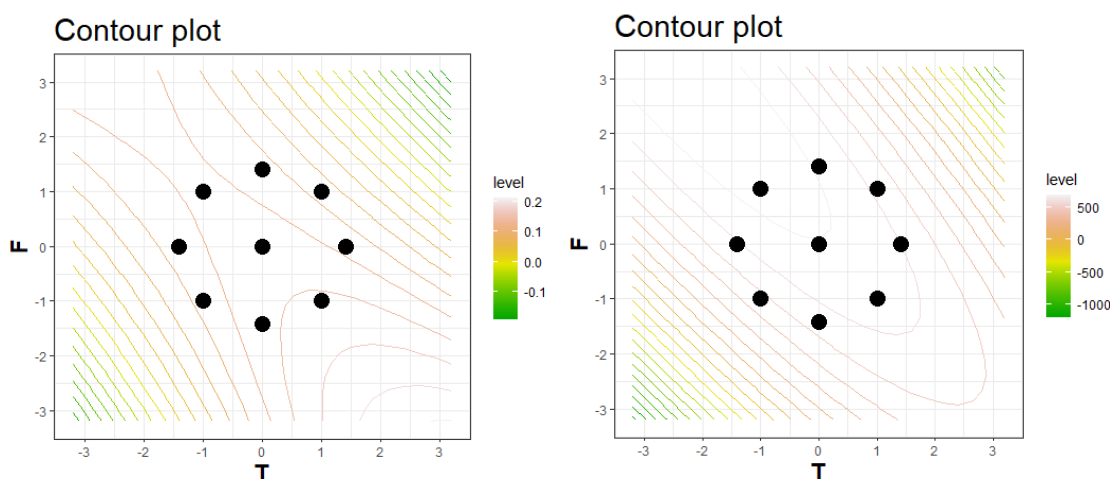
A mesterségesen öregített olaj átlagos kopásátmérő értékeire illeszkedő másodfokú modellt leíró egyenlet a következő:

$$y = 699.385 + 3.455(T) + 49.125(F) - 51.165(T^2) - 39.747(F^2) - 81.625(T \times F).$$

A másodfokú modell pontosságának ellenőrzéséhez ebben az esetben is a 60 °C (-1) és 150 N (-1) kódolt változói kerültek behelyettesítésre:

$$y = 699.385 + 3.455(-1) + 49.125(-1) - 51.165(-1^2) - 39.747(-1^2) - 81.625(-1 \times -1) = 623.683.$$

A kísérlet során kapott eredmény 497.7  $\mu\text{m}$  volt, így a mért értékhez képesti eltérés 25.3% volt. A mesterséges öregítés eredményeként létrejövő fizikai-kémiai tulajdonságok rendkívül instabillá tették ezt a rendszert, aminek leírására szintén nem elegendő a másodfokú modell, ahogy ezt az alábbi ábrák is alátámasztják. Ebben az esetben nem volt szükség a súrlódási együtthatóra illeszkedő egyenlet ellenőrzésére, mivel a bal oldali ábrából egyértelműen látszik a modell pontatlansága.



26. ábra: A mesterségesen öregített olaj másodfokú modellje (balra a súrlódási együttható, jobbra az átlagos kopásátmérő ábrázolása)

A változók rendszerre gyakorolt hatásait vizsgálva igazat nyert az a korábban tett állítás, mi szerint az eredményeket ebben az esetben a hőmérséklet és a terhelés kölcsönhatása befolyásolja a legnagyobb mértékben.

### 5.5.3. 0W20 viszkozitású, alternatív tüzelőanyaggal szennyezett kenőolaj modellje

Az etanollal szennyezett olaj átlagos kopásátmérő értékeire illeszkedő másodfokú modellt leíró egyenlet a következő:

$$y = 512.421 + 11.219(T) + 40.973(F) + 4.788(T^2) - 1.701(F^2) - 3.105(T \times F).$$

A másodfokú modell pontosságának ellenőrzéséhez jelen esetben is a 60 °C (-1) és 150 N (-1) kódolt változói kerültek behelyettesítésre:

$$y = 512.421 + 11.219(-1) + 40.973(-1) + 4.788(-1^2) - 1.701(-1^2) - 3.105(-1 \times -1) = 460.211.$$

A kísérlet során kapott átlagos kopásátmérő 464.2 µm volt, amit -0.9%-os eltéréssel közelített a másodfokú modell alapján meghatározott egyenlet. A súrlódási együttható értékekre illeszkedő másodfokú modellt leíró egyenlet a következő:

$$y = 0.1371 + 0.0017(T) - 0.0095(F) - 0.0091(T^2) - 0.0047(F^2) - 0.0178(T \times F).$$

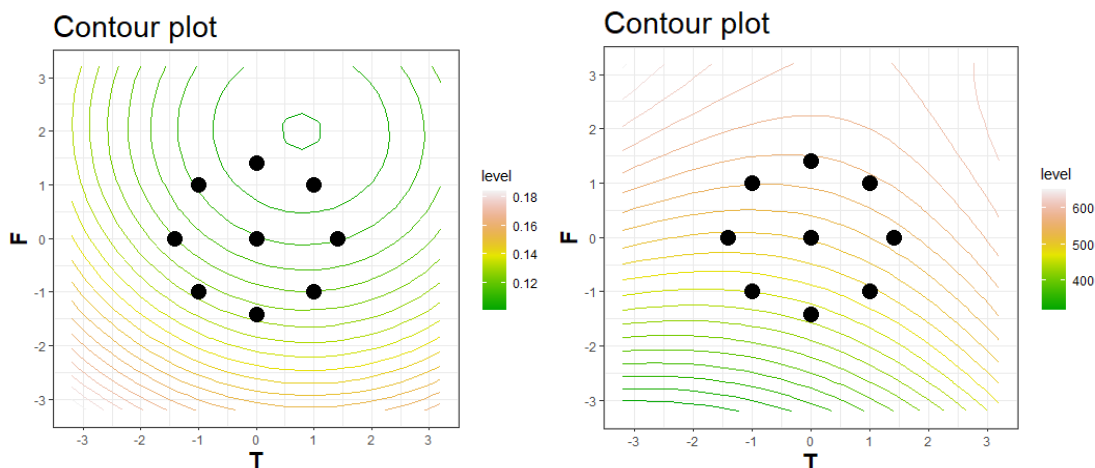
A másodfokú modell pontosságának ellenőrzéséhez szintén a 60 °C (-1) és 150 N (-1) kódolt változói kerültek behelyettesítésre:

$$y = 0.1371 + 0.0017(-1) - 0.0095(-1) - 0.0091(-1^2) - 0.0047(-1^2) - 0.0178(-1 \times -1) = 0.1133.$$

A kísérlet során kapott súrlódási együttható 0.1221 volt, így a mért értékhez képesti eltérés -7.2% volt. Ez azt mutatja, hogy mind a két esetben elegendő volt a másodfokú modell a rendszer leírására. Ez, az átlagos kopásátmérők alacsony szórása, illetve az alábbi ábrák is jól mutatják a rendszer stabilitását. A jobboldali ábrán lévő kontúrvonalak a valóságnak megfelelő mértékben ábrázolják az átlagos kopásátmérők változását a hőmérséklet és a terhelés függvényében. Leolvasható továbbá az is, hogy a terhelés növekedése jelentősebb mértékben befolyásolta az eredmények alakulását. A baloldali ábra kiválóan szemlélteti a rendszerben elérhető legalacsonyabb súrlódási együttható várható helyét a  $T = 0.75$  és  $F = 2$  pontban. A

szoftver a „predict” parancs segítségével a súrlódási együttható becsült értékét is meghatározta: 0.1008.

A másodfokú modell validálása érdekében ebben a pontban újabb három mérés került futtatásra, amit a következő fejezet dolgoz fel.



27. ábra: Az etanollal szennyezett olaj másodfokú modellje (balra a súrlódási együttható, jobbra az átlagos kopásátmérő ábrázolása)

## 5.6. Másodfokú modell validálása és kiegészítése új eredményekkel

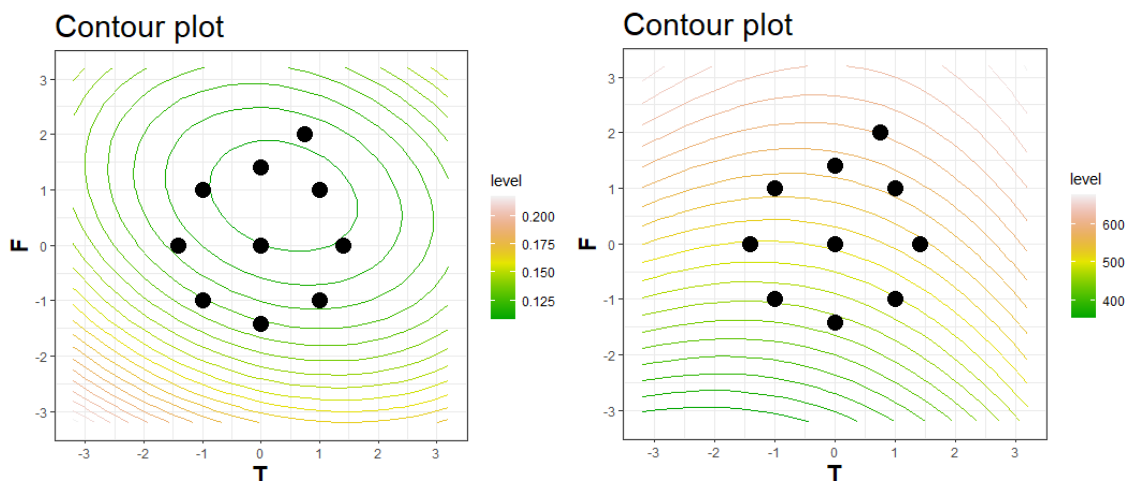
Az előző fejezetben meghatározott  $T = 0.75$  és  $F = 2$  kódolt értékeket valós értékekre átváltva a következő kísérleti paraméterek álltak rendelkezésre: 95 °C hőmérséklet és 300 N terhelés. Ebben a pontban a kísérlet háromszor került megismétlésre, ahogy korábban a középpont esetében is. A három mérési eredmény átlagos súrlódási együtthatója 0.1118 lett, ami 9.8%-ban tért el a korábban becsült értéktől, míg az átlagos kopási átmérő 595.5  $\mu\text{m}$  volt ebben a pontban. A súrlódási együttható becsült értéke nagyon közel volt a valósághoz, de az új eredmények rögzítésre kerültek a korábbi modell 11 pontja mellé, pontosabbá téve ezzel a rendszer leírását. A súrlódási együttható értékeket figyelembe véve a három új ponttal kiegészített modellt leíró egyenlet a következőre módosult:

$$y = 0.1087 - 0.003(T) - 0.0073(F) + 0.0024(T^2) + 0.0038(F^2) + 0.0013(T \times F).$$

A másodfokú modell pontosságának ellenőrzéséhez szintén a 60 °C (-1) és 150 N (-1) kódolt változói kerültek behelyettesítésre:

$$\begin{aligned} y &= 0.1087 - 0.003(-1) - 0.0073(-1) + 0.0024(-1^2) + 0.0038(-1^2) \\ &\quad + 0.0013(-1 \times -1) = 0.1265. \end{aligned}$$

A modell kiegészítése előtt a súrlódási együttható értéke ebben a pontban 0.1133 volt, míg a tényleges, kísérletből származó eredmény 0.1221 volt. A három új kísérletből származó eredménnyel kiegészítve az új egyenlet 3.6%-kal pontosabb becslést adott az előzőnél. A kiegészítésnek köszönhetően a súrlódási együttható legalacsonyabb értékének várható helye is a korábban meghatározott modell pontjai közé esett.



28. ábra: Az új pontokkal kiegészített másodfokú modell ábrázolása

Ebben a viszonylag lassú, kis lökethossz és extrém kontaktnyomás mellett üzemelő (~3.6 GPa) rendszerben 11 mérés segítségével felépíthető egy olyan másodfokú modell, ami jó közelítéssel mutatja meg a legalacsonyabb súrlódási együttható és a legkisebb átlagos kopásátmérő várható pontját, ezáltal pedig a hozzá tartozó hőmérsékleti és terhelési változók értékét.

## 6. Összegzés

Jelen kutatás egy másodfokú modell felépítésén keresztül mutatta be a kísérlettervezés fontosságát. A tudatos tervezésnek köszönhetően 2<sup>5</sup>-en kísérlet helyett csupán 11 kísérletre volt szükség, ahhoz, hogy egy adott rendszer tulajdonságai feltérképezésre kerüljenek. Habár a mesterségesen öregített olaj esetében nem volt elegendő a másodfokú közelítés, a referencia és az alternatív tüzelőanyaggal szennyezett olajnál a mért és a becsült értékek százalékos eltérései 0.5% és 15% között mozogtak. A felépített másodfokú modell előrejelzése az etanollal szennyezett olajnál csupán 9.8%-kal tért el a valós, mért értéktől. Ezt figyelembe véve a modell nem csak a rendszer tulajdonságainak feltérképezésére volt alkalmas, de a jövőbeni kísérletek irányát is meghatározta.

A mesterségesen öregített olaj vizsgálata során kapott nagyobb átlagos kopásátmérők és az ingadozó súrlódási együtthatók a termo-oxidatív öregítési eljárás eredményeként bekövetkezett kopásgátló adalék (ZDDP) lebomlására vezethetők vissza. Korábbi kutatások igazolták továbbá, hogy a ZDDP lebomlásával keletkező reakciótermékek (pl. cink-foszfát vegyületek) ideiglenesen jobb kopásállóságot biztosítanak az érintkező felületeknek. [23.]

A kutatás fókuszában az alternatív tüzelőanyaggal - ebben az esetben etanollal - szennyezett kenőolaj súrlódási és kopási paramétereinek meghatározása állt. A tribométeres kísérletekből származó eredményeket összehasonlítva erre az olajra alacsonyabb súrlódási együttható és közepes mértékű kopás volt a jellemző. A spektroszkópia kimutatta továbbá a kopásgátló adalék jelenlétét, a viszkozitás mérésnél pedig észrevehető volt a hőmérséklet emelkedésével mérséklődő különbség a három olaj között. A bevezetésben is említett komplexitás miatt az eredmények átfogó összegzésére volt szükség a látszólagos ellentmondások eloszlatásához. Az alacsony súrlódási együttható és a magasabb kopás a kenésállapotok változására vezethető vissza.

A hidrodinamikus kenésállapot – amit az olajfürdővel biztosított kenőolaj jelenléte, illetve a felületek egymáshoz képesti elmozdulása idézett elő – kisebb kopásnyomhoz vezetett, mivel az érintkező felületek között egy teherviselő folyadékréteg alakult ki. Az etanol azonban csökkentette a kenőolaj viszkozitását, előtérbe helyezve a felületeken létrejött határréteg kenőképességét. Ebben az esetben már nem hidrodinamikai, hanem kevert kenésállapot állt fent, ami súrlódási együttható szempontjából ideális volt, de nagyobb kopást idézett elő az alkatrészek felületén. A komplex rendszer másik fontos tényezője az etanol párolgása, ami mérsékelte a hőmérséklet növekedésével együtt járó viszkozitás csökkenését. Ezeket az információkat és a kísérleti eredményeket összegezve az a megállapítás tehető, hogy a vizsgált

rendszerben, alacsony hőmérsékleten az olaj viszkozitása, míg magas hőmérsékleten a felületeken kialakuló határréteg befolyásolja a súrlódási együttható és az átlagos kopásátmérő értékeit. Véleményem szerint további kísérletek szükségesek az etanol jelenléte miatt megváltozott határréteg vizsgálatára, hogy egyértelművé váljon ez a következtetés.

## Ábrajegyzék

|           |                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra:  | Stribeck-görbe sematikus ábrája [2.].....                                                                                                                                                                     | 2  |
| 2. ábra:  | A közlekedési szektorban előre jelzett globális kereslet üzemanyagtípusok szerint 2000-től 2040-ig [3.] .....                                                                                                 | 3  |
| 3. ábra:  | Elhasználódott kenőolaj a motorban [4.].....                                                                                                                                                                  | 4  |
| 4. ábra:  | A belsőégésű motor hengerfalán kialakuló olajfilm réteg [5.].....                                                                                                                                             | 5  |
| 5. ábra:  | Az nVCT mérés A mérőkör beépítése a kenőanyag-körbe [6.] .....                                                                                                                                                | 6  |
| 6. ábra:  | Baloldalon a dugattyú-gyűrű és a hengerfal szegmens látható, zöld ellipszissel jelölve a kopási zónát. A jobb oldali képen a kopási zóna van kinagyítva, piros körrel jelölve a vizsgált területet. [7.]..... | 7  |
| 7. ábra:  | A befecskendezett D100 és B10 tüzelőanyagok különböző hőmérséklet/főtengely pozíció esetén [8.].....                                                                                                          | 8  |
| 8. ábra:  | „Central circumscribed” modell.....                                                                                                                                                                           | 12 |
| 9. ábra:  | Optimol SRV®5 tribométer [12.] .....                                                                                                                                                                          | 13 |
| 10. ábra: | Oszcillációs modul [13.].....                                                                                                                                                                                 | 14 |
| 11. ábra: | Keyence VHX 1000 digitális mikroszkóp [14.] .....                                                                                                                                                             | 15 |
| 12. ábra: | Leica DCM3D konfokális mikroszkóp [16.].....                                                                                                                                                                  | 16 |
| 13. ábra: | Anton Paar SVM 3001 viszkoziméter [17.] .....                                                                                                                                                                 | 17 |
| 14. ábra: | Bruker INVENIO S Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia [20.] .                                                                                                                                    | 18 |
| 16. ábra: | Súrlódási együtthatók (COF).....                                                                                                                                                                              | 20 |
| 17. ábra: | Súrlódási együttható (piros) alakulása a 8. mérés esetében (100 °C, 150 N).....                                                                                                                               | 21 |
| 18. ábra: | N09_1 golyó kopásnyoma méretezve.....                                                                                                                                                                         | 22 |
| 19. ábra: | Mérés megismételhetőségének ellenőrzése a középső (80°C, 200 N) pontban szórás kimutatásával .....                                                                                                            | 22 |
| 20. ábra: | Kopástérfogat meghatározása.....                                                                                                                                                                              | 23 |
| 21. ábra: | Kinematikai viszkozitás.....                                                                                                                                                                                  | 24 |
| 22. ábra: | A három kenőolaj spektruma.....                                                                                                                                                                               | 25 |
| 23. ábra: | Szilikon csúcs az olajspektrumon.....                                                                                                                                                                         | 26 |
| 24. ábra: | Programozás az R szoftver környezetében [22.] .....                                                                                                                                                           | 27 |
| 25. ábra: | A referencia olaj másodfokú modelljének ábrázolása baloldalon a súrlódási együtthatóval, jobboldalon az átlagos kopásátmérővel (a modell felállításához használt mérési pontokat fekete kör jelöli).....      | 28 |
| 26. ábra: | A mesterségesen öregített olaj másodfokú modellje (balra a súrlódási együttható, jobbra az átlagos kopásátmérő ábrázolása) .....                                                                              | 29 |
| 27. ábra: | Az etanollal szennyezett olaj másodfokú modellje (balra a súrlódási együttható, jobbra az átlagos kopásátmérő ábrázolása) .....                                                                               | 31 |
| 28. ábra: | Az új pontokkal kiegészített másodfokú modell ábrázolása .....                                                                                                                                                | 32 |

## Táblázatjegyzék

|              |                                                                    |    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1. táblázat: | Kísérleti paraméterek (forrás:[10.], szerzői módosítással) .....   | 10 |
| 2. táblázat: | Saját kísérlet paraméterei .....                                   | 12 |
| 3. táblázat: | Az elemzett súrlódási együtthatók átlagának összehasonlítása ..... | 20 |

## Rövidítések és szimbólumok jegyzéke

|       |   |                                                   |
|-------|---|---------------------------------------------------|
| AWSD  | – | Átlagos kopásátmérő                               |
| B10   | – | 10% biodízel tartalmú üzemanyag                   |
| COF   | – | Súrlódási együttható                              |
| D100  | – | 100%-os dízelüzemanyag                            |
| DOE   | – | Kísérlettervezés                                  |
| EDX   | – | Energiadiszperzív röntgenspektroszkópia           |
| FTIR  | – | Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia |
| HRA   | – | Nagysebességű adatrögzítés                        |
| nVCT  | – | Radionuklid technológiás online kopásmérés        |
| SEM   | – | Pásztázó elektronmikroszkóp                       |
| $W_v$ | – | Kopástérfogat                                     |
| XPS   | – | Röntgen-fotoelektron spektroszkópia               |
| ZDDP  | – | Cink-dialkil-ditiofoszfát, kopásgátló adalék      |

## Irodalomjegyzék

- [1.] Costa, H. L., Cousseau, T., Souza R. M., „Current Knowledge on Friction, Lubrication, and Wear of Ethanol-Fuelled Engines—A Review”, *Lubricants* 11.7 (2023): 292., <https://doi.org/10.3390/lubricants11070292>
- [2.] Wang, Y., Wang, Q.J., „Stribeck curves.” *Encyclopedia of Tribology*. Springer, 2013. 3365-3370, [https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_148](https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_148)
- [3.] Bae, C., Kim, J., „Alternative fuels for internal combustion engines”, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, is. 3, pp. 3389-3413, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.009>
- [4.] Idzior, M., „Aging of engine oils and their influence on the wear of an internal combustion engine”, *Combustion Engines*, vol. 185, pp. 15-20, 2021, doi: 10.19206/CE-138033
- [5.] Steinschütz, K., Geringer, B., Jech, M., Urbanek, M., Wopelka, T., Besser, C., „Impact of oil aging on wear of piston ring and cylinder liner system”, *SAE Technical Paper*, 2010-32-0124, 2010, doi: 10.4271/2010-32-0124, <https://doi.org/10.4271/2010-32-0124>
- [6.] Wei, N., Gu, J. X., Gu, F., Chen, Z., Li, G., Wang, T., Ball, A. D., „An investigation into the acoustic emissions of internal combustion engines with modelling and wavelet package analysis for monitoring lubrication conditions”, *Energies*, vol. 12, is. 4, 640, 2019, <https://doi.org/10.3390/en12040640>
- [7.] Lenauer, C., Tomastik, C., Wopelka, T., Jech, M., „Piston ring wear and cylinder liner tribofilm in tribotests with lubricants artificially altered with ethanol combustion products”, *Tribology International*, vol. 82/B, 2015, pp. 415-422, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.04.034>
- [8.] Temizer, İ., Arı, A., „Effects on ring wear of bioethanol/diesel fuel blends used at long term endurance tests in a DI engine”, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 11, is. 4, pp. 140-151, 2022, <https://doi.org/10.18245/ijaet.1150240>
- [9.] Nicolae, M., Basarman, A., „Optimizing the Equation of Impact Forces Produced by Water Jets Used in Sewer Cleaning”, *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, ISSN 14537303 (2017)

- [10.] Dunn, K.G. “Process Improvement using Data”, [online] Available at: <https://learnche.org/pid> [Accessed: 14 June 2023]
- [11.] “ISO 19291:2016, Lubricants — Determination of tribological quantities for oils and greases — Tribological test in the translatory oscillation apparatus.” International Organization for Standardization, Geneva, 2016, [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/64298.html>.
- [12.] H Koehlerinstrument.: SRV5 teszttrendszer, <https://koehlerinstrument.com/products/srv5-test-system/>, 2023.11.07
- [13.] Lenart, A.; Pawlus, P.; Wos, S., „Dzierwa, A. The Effect of Surface Texturing on Dry Gross Fretting”, *Lubricants* 2018, 6, 92., doi:
- [14.] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5708>, 2023.11.07
- [15.] [ps://www.fh-ooe.at/en/wels-campus/werkstofftechnik/departement-of-materials-engineering/equipment/microskopy/leica-dcm3d-confocal-microscope/](https://www.fh-ooe.at/en/wels-campus/werkstofftechnik/departement-of-materials-engineering/equipment/microskopy/leica-dcm3d-confocal-microscope/), 2023.11.07
- [16.] JHTT SZE.: Felületanalitikai labor, <https://szolgaltatas.sze.hu/feluletanalitikai-laboratorium>, 2023.11.07
- [17.] <https://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=58424&L=0>, 2023.11.07
- [18.] <https://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kemia7/www/ch04s02.html>, 2023.11.07
- [19.] “ASTM E2412-10(2018), Standard Practice for Condition Monitoring of InService Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry.” ASTM International, West Conshohocken, 2018, doi: 10.1520/E2412-10R18.
- [20.] <https://www.spectroscopyeurope.com/product/brokers-invenio-s-research-ft-ir-spectrometer>, 2023.11.07
- [21.] “ASTM D7755-11(2017), Standard Practice for Determining the Wear Volume on Standard Test Pieces Used by High-Frequency, Linear-Oscillation (SRV) Test Machine.” ASTM International, West Conshohocken, 2017, doi: 10.1520/D7755-11R17
- [22.] R Core Team (2023). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- [23.] Dörr, Nicole, et al, „Correlation between engine oil degradation, tribochemistry, and tribological behavior with focus on ZDDP deterioration”, Tribology Letters 67 (2019): 1-17.