

# A tüzelőanyagból és a beszívott levegőből származó oxigénmennyiség hatásai

## The effects of oxygen from the fuel and the intake air

VIRT Márton<sup>1</sup>, Dr. ZÖLDY Máté<sup>1</sup>

1 – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3., tel.: +36 1 463-1111, fax: +36 1 463-1110, [info@bme.hu](mailto:info@bme.hu), [www.bme.hu](http://www.bme.hu)

### Abstract

*One of the greatest challenges of today's vehicle technology is the emission reduction of internal combustion engines, and the efficiency increasing of the combustion. The in-cylinder oxygen content is a major factor for these goals. However, the oxygen can get into the combustion chamber by two paths: through the intake air and the fuel. The oxygen from different sources can have a different effect on the combustion and emission, therefore this paper investigate these two paths.*

**Keywords:** Combustion, Emission, Advanced Fuels, Oxygen, Exhaust Gas Recirculation

### Kivonat

*A modern járműtechnológia egyik legnagyobb kihívása a belsőégésű motorok emissziócsökkentése és az égésfolyamatok hatékonyabbá tétele. A hengerbe kerülő oxigénmennyiség egy komoly tényező ezekből a szempontokból. Ugyanakkor ez az oxigén két módon is a hengerbe juthat: a beszívott levegő és a tüzelőanyag által. A két forrásból származó oxigén különböző hatásokat gyakorolhat az égésfolyamatra és a károsanyagok keletkezési mechanizmusaira, így érdemes ezeket külön-külön vizsgálat tárgyává tenni.*

**Kulcsszavak:** Égésfolyamat, Emisszió, Fejlett Tüzelőanyagok, Oxigén, Kipufogógáz Visszavezetés

## 1. Bevezetés

Az új Európai Unió szabályzások hatására a személygépjárművek és könnyű haszongépjárművek kategóriájában a belsőégésű motorok háttérbe szorulása várható. Az elektromos technológia fejlettségi szintje ezekben a kategóriákban néhány felhasználási területtől eltekintve indokolja a döntést. Ugyanakkor számos területen még sokáig nem lehet költséghatékonyan más meghajtási módokat alkalmazni [1]. Az akkumulátorok kis energiasűrűsége csökkenti a nehézhaszongépjárművek hasznos terhet, problémássá teszi a buszok téli fűtését, valamint növeli az össztömeget -ezáltal az energiafogyasztást. Várhatóan ezeken a területeken még sokáig a kompressziógyújtású motorok adják az optimális megoldást költséghatékonyaságuk és a szikragyújtású motorokénál nagyobb hatásfokuk miatt. Ugyanakkor a károsanyag-kibocsátás egy komoly problémája ezeknek a motoroknak. Ezen belül is a nitrogén-oxid (NO<sub>x</sub>) és szilárd részecske (PM) emisszió a meghatározó. Ezen emissziók csökkentésére számos elterjedt megoldás létezik. A katalizátoros kipufogógáz utókezelésen túl a nyersemisszió is több módszerrel csökkenthető. Ezek közül az egyik a kipufogógáz visszavezetés (EGR), melynek segítségével a NO<sub>x</sub> kibocsátás hatékonyan csökkenthető [2]. Ez egyrészt az égéstermékek nagy hőkapacitása miatti hőmérséklet csökkenéséből, másrészt a beszívott levegő oxigéntartalmának csökkenéséből adódik. Mindkét hatás a Zeldovich mechanizmus [3] visszaszorulásához járul hozzá, amin keresztül a beszívott levegő nitrogénjéből nitrogén-monoxid alakul ki oxigénben dús és nagy hőmérsékletű környezetben. Ugyanakkor a hőmérséklet csökkenése és az oxidációs körülmények romlása növeli a PM emissziót az intenzívebb koromképződés miatt. Ezért hagyományos dízelmotorok esetén ez a két károsanyag kibocsátás csak egymás rovására javítható, tehát egy NO<sub>x</sub>-PM kompromisszum áll fent. Ezen segíthet a fejlett tüzelőanyagok alkalmazása. Számos kutatás bizonyítja, hogy ezek segítségével hatékonyan javítható a NO<sub>x</sub>-PM kompromisszum [4], ide értve a saját korábbi eredményeinket is [5]. Ezek az alternatív vegyületek gyakran oxigéntartalmúak. Az így megjelenő többlet oxigén javítja az oxidációt, tehát segíti koromképződés visszaszorítását, ugyanakkor a NO<sub>x</sub> emisszió növekedhet.

Mint látható, az oxigén két úton juthat be a hengerbe: a tüzelőanyaggal, vagy a beszívott levegővel. Az, hogy az égésfolyamat és az emisszió szempontjából milyen hatása van egy adott oxigén atomnak, nagyban függ a bejuttatásának módjától. Ebben a cikkben azt elemezzük, hogy a hengerben lévő oxigén tömegének változása milyen hatást gyakorol a  $\text{NO}_x$  és PM emisszióra attól függően, hogy a tömegváltozást a tüzelőanyag vagy a levegő oxigéntartalmának változtatásával érjük el. Ennek segítségével az oxigéntartalmú vegyületek  $\text{NO}_x$ -PM kompromisszum javító hatására is kitekintést teszünk. A tanulmány végén az égésfolyamatra gyakorolt hatásokat is elemezzük. Ehhez az égéstartam változását vizsgáljuk meg az oxigéntömeg változások függvényében.

## 2. Alkalmazott eszközök és módszerek

### 1.1. A mérőrendszer

A motorfékpad méréseket egy Cummins ISBe 170 30 típusú haszonjármű dízelmotoron végeztük el. Az Euro 3 besorolású motor négyhengeres, négyütemű, turbófeltöltött, közös nyomócsöves, és magasnyomású kipufogógáz visszavezető rendszerrel (HP-EGR) rendelkezik. A fékpad kialakítása lehetővé teszi a kis- és nagymennyiségű tüzelőanyag minták vizsgálatát is. A motor főbb paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

A mérőmotor főbb paramétereit

1. táblázat

Lökettérfogat	Furat	Lökét	Kompresszióviszony	Névleges effektív teljesítmény
3922 cm <sup>3</sup>	102 mm	120 mm	17.3	125 kW

A munkapontok egy örvényáramú fékgép segítségével állíthatóak be. Az égésfolyamat vizsgálatához egy AVL GH13P típusú piezoelektromos nyomásérzékelőt, egy AVL 365C típusú szögjeladót, valamint egy AVL 612 IndiSmart berendezést használtunk fel. Ezen kívül a szívó és kipufogó oldali oxigén és  $\text{NO}_x$  koncentrációt egy Continental UniNox szenzorral mértük, az opacitást pedig egy AVL 439 típusú opaciméterrel. A bemutatott mérési eredmények a motor kezeletlen nyersemisszióját írják le.

### 1.2. A módszertan

A  $\text{NO}_x$  koncentrációból az emisszió a kipufogóoldali tömegáram és az effektív teljesítmény segítségével lett g/kWh mértékegységre átválva. Az opacitásból a [6]-ban ismertetett módon lett kiszámítva először a füstölési szám, majd a füstűrűség, és végül ebből a PM emisszió g/kWh-ban. Az égéstartamot az IndiSmart által szolgáltatott égéskezdet és égés vége adatok különbsége adja. Az égéskezdet a teljes felszabadult hőmennyiség 5%-ához, az égés vége pedig a hőmennyiség 90%-ához tartozó főtengelyszögként lett definiálva. A hengerbe beszívott levegő tömege a szívócsőnyomásból és hőmérsékletből lett kiszámítva az ideális gáztörvény segítségével a motorra általánosan jellemző 80%-os volumetrikus hatások mellett. Ezt, valamint a szívóoldali oxigénkoncentrációt felhasználva számítottuk ki a beszívott levegővel a hengerbe bejutó oxigén tömegét az alábbi egyenlet szerint:

$$m_{O_2 Lev} = \frac{p_{be} V_h}{T_{be} R_{Lev}} \eta_{vol} c_{O_2 Lev} \quad (1)$$

ahol  $p_{be}$  a szívóoldali nyomás,  $V_h$  a hengertérfogat,  $T_{be}$  a beszívott levegő hőmérséklete,  $R_{Lev}$  a levegő gázállandója,  $\eta_{vol}$  a volumetrikus hatások és  $c_{O_2 Lev}$  a levegő oxigénkoncentrációja.

A tüzelőanyaggal bejuttatott oxigén tömege a tüzelőanyag oxigénkoncentrációjából és a befecskendezett dózisból lett meghatározva, ami pedig a motor fogyasztásából adódik:

$$m_{O_2 Tüz} = \frac{c_{O_2 Tüz} \dot{i}_{mot} B_t}{z_{mot} n} \quad (2)$$

ahol  $c_{O_2 Tüz}$  a tüzelőanyag oxigénkoncentrációja,  $\dot{i}_{mot}$  a motor ütemszámának fele,  $B_t$  a motor tüzelőanyag fogyasztása,  $z_{mot}$  a hengerek száma és  $n$  a fordulatszám.

A mérések során a HP-EGR szelep nyitásával növelésével csökkentettük a beszívott levegő oxigéntartalmát, a tüzelőanyagét pedig a használt keverékek változtatásával. Összesen 4 keveréket használtunk

a mérésekhez. A keverékek a B7 gázolaj mellett oximetilén éter (OME) és 1-dekanolt (DEK) tartalmaztak olyan arányban, hogy sűrűségük és viszkozitásuk közel maradjon az EN590 elvárásaihoz. Az oximetilén éter egy nagy cetánszámmal és kiemelkedően magas oxigéntartalommal rendelkező vegyület [7]. Az 1-dekanol egy 10 szénatomos primer zsíralkohol, aminek tulajdonságai a gázolajhoz közeli, viszont az oxigéntartalma a B7-nél magasabb [8]. A keverőkomponensek térfogatszázalékos arányaival megadott keverékek kémiai összetételei a 2. táblázatban láthatóak:

Az alkalmazott keverékek kémiai összetétele (tömegarányok)

2. táblázat

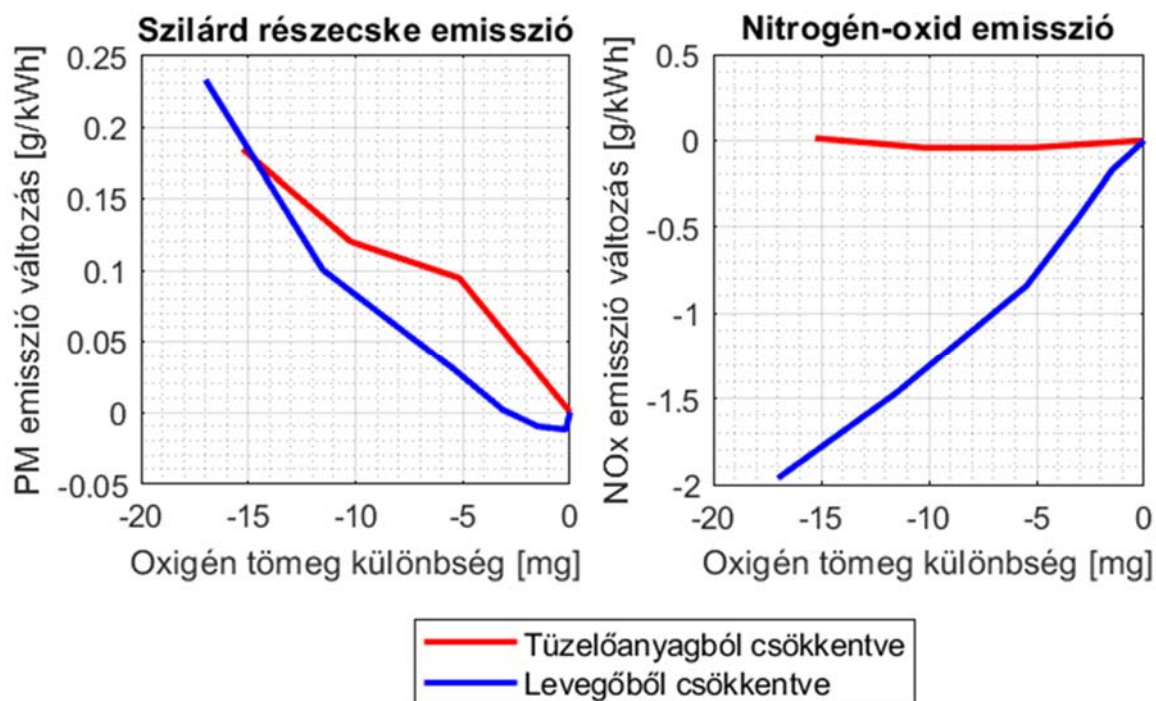
Keverék	Szén koncentráció	Hidrogén koncentráció	Oxigén koncentráció	Kén koncentráció
OME30_DEK70	0.6447	0.1211	0.2342	0
OME20_DEK50	0.7116	0.1239	0.1631	0.0014
OME10_DEK30	0.7814	0.1270	0.0887	0.0029
DEK10	0.8545	0.1301	0.0109	0.0045

Az elemzések során a kiinduló állapot az OME30\_DEK70 keverék EGR nélkül, 1400 rpm és 300Nm terhelés mellett. Ez az eset tartalmazza a legtöbb oxigént az égéstérben. Ebből kiindulva két vizsgálatot végzünk. Az első vizsgálatnál az EGR ráta növelésével a beszívott levegő oxigénkoncentrációját csökkentjük, míg a keverék ugyanaz marad. A második vizsgálatnál nem alkalmazunk EGR-t, ehelyett a keverékek oximetilén éter és dekanol tartalmának csökkentésével csökkentjük a tüzelőanyag oxigénkoncentrációját. Így a két vizsgálat során az oxigéntartalom változásának függvényében kaphatók görbék. A két vizsgálat görbéjének összehasonlításából kiadódik, hogy az egyes paraméterek melyik forrásból származó oxigénre érzékenyebbek.

### 3. Eredmények

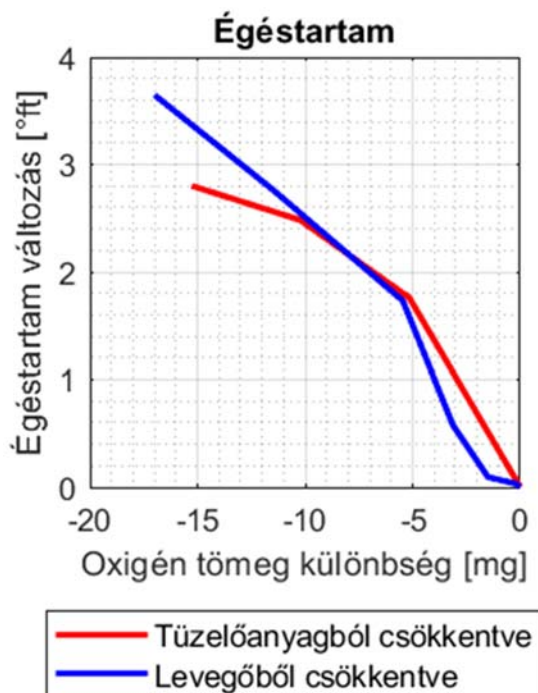
Az eredmények közül elsőként az emissziók alakulását vizsgáljuk meg az 1. ábra segítségével. Az 1. ábra bal oldalán látható, hogy az oxigéntartalom csökkenése mindkét vizsgálat esetén a koromkibocsátás növekedését eredményezte. Ez logikus eredmény, mivel a levegőben kevesebb rendelkezésre álló oxigén miatt a heterogén keverékben képződő szilárd szénvegyületek kevésbé képesek elégni. Ugyanakkora oxigéntömeg változás esetén ha az adott tömeg a tüzelőanyagból tűnik el, sokkal nagyobb a PM emisszió növekedése. Ez arra utal, hogy a koromképződést az oxigénben lévő tüzelőanyag mennyisége érzékenyebben érinti, mint a levegőben lévő oxigéntömeg változása. A mérést nagy terhelésen végeztük, így ekkor az égésfolyamat során a diffúziós szakasz lesz a meghatározó. Ez egy keveredés által korlátozott folyamat, ami során a tüzelőanyagcseppek belső része nem érintkezik a levegővel és a magas hőmérséklet hatására itt kialakulnak a szilárd szénvegyületek. Viszont ha a tüzelőanyag már magában hordozza az oxidációhoz szükséges oxigént, akkor ez hatékonyan csökkentheti a koromképződést. A cseppek belső részén lejátszódó folyamatokra nincs nagy hatása a levegő oxigéntartalmának, az csak a korom későbbi elégéséhez járul hozzá. Ezek alapján érthető, hogy a tüzelőanyag oxigéntartalmára érzékenyebb a PM emisszió nagy terhelésen.

Az 1. ábra jobb oldalán a NO<sub>x</sub> emisszió alakulása látható. Itt a levegő oxigéntartalmának csökkenése a NO<sub>x</sub> képződés jelentős csökkenéséhez vezetett, bár ehhez feltehetően az EGR hőmérséklet csökkentő hatása is jelentősen hozzájárult. A Zeldovich mechanizmushoz szükséges magas hőmérséklet és oxigénben gazdag környezet csökkenése okozza a NO<sub>x</sub> kibocsátás javulását. A tüzelőanyagban történő oxigéntömeg csökkenés nem okoz nagy változást. A Zeldovich mechanizmus a levegő nitrogénjével játszódik le, ezzel pedig leginkább a levegő oxigénje érintkezik, a tüzelőanyagé kevésbé. Emiatt a NO<sub>x</sub> emisszió változása érzékenyebb a levegő oxigéntartalmára.



1. ábra. A mért nyersemissziók változása a hengerbe különböző módon juttatott oxigénmennyiség hatására

Ezek az eredmények jól magyarázzák az oxigéntartalmú vegyületek  $\text{NO}_x$ -PM kompromisszum javító hatását nagy terhelés mellett. Ekkor a tüzelőanyag oxigéntartalma visszaszorítja a koromképződést, és nem fog nagy hatást gyakorolni a Zeldovich mechanizmusra. Ezután ezen az eltoltt kompromisszumgörbén a helyes EGR ráta megválasztásával előállítható egy tiszta gázolajénál jobb károsanyag kibocsátású pont. Ugyanakkor az oxigéntartalom növekedése legtöbb esetben a fűtőérték csökkenéséhez, ezáltal a fogyasztás növekedéséhez vezet, valamint a tömítésekre gyakorolt károsító hatás is erősödhet [9]. Így az új fejlett motorhajtóanyagok oxigéntartalmának megválasztását több szempont alapján is mérlegelni kell.



2. ábra. Az égéstartam változása a hengerbe különböző módon juttatott oxigénmennyiség hatására

A tanulmány utolsó részeként az égésfolyamatra gyakorolt hatásokra is kitekintést teszünk. A 2. ábrán az égéstartam változása látható az oxigéntömeg változás függvényében. Mindkét görbe az égéstartam növekedését mutatja az oxigén elvonásának hatására. A diffúziós égésfolyamat sebességét a keveredés sebessége felülről korlátozza, mivel a tüzelőanyagcseppek belseje nem vesz részt hatékonyan az égésfolyamatban. Ha a beszívott levegő oxigénkoncentrációja csökken, akkor a kevesebb elérhető oxigén miatt az oxidációs folyamatok is lassulnak. Ha a tüzelőanyagban megjelenik az oxigén, akkor az oxidáció a cseppek belső részén is javulhat, ami szintén gyorsítja az égést. A két folyamat hatása közt nincs jól elhatárolható különbség a 2. ábrán. Ugyanakkor jól megfigyelhető, hogy az égéstartam változása a hajtóanyag oxigéntartalom változás hatására sokkal nagyobb az oxigénben gazdagabb keverékeknel. Ez alapján feltételezhető, hogy a vizsgálatnál magasabb oxigéntartalmú hajtóanyagok esetén az égéstartam érzékenyebb lenne a tüzelőanyag oxigéntartalmára, mivel ekkor a cseppek belső részén is egyre jobban javuló oxidáció indulhatna meg.

#### 4. Konklúzió

Az itt ismertetett kutatómunkában a hengerben lévő oxigénmennyiség változásának hatásait vizsgáltuk meg annak függvényében, hogy a tüzelőanyag, vagy a beszívott levegő oxigéntartalmát változtatjuk meg. A nagy terhelésen elvégzett mérések szerint az dízelmotorok emissziós jellemzői javíthatók a tüzelőanyag oxigéntartalmának növelésével, mivel egy jobb NO<sub>x</sub>-PM kompromisszumot érhetünk el. Ennek oka, hogy a diffúziós égés során jelenlévő tüzelőanyagcseppek belsejében kevesebb szilárd szénvegyület képződik az ott megjelenő oxigén hatására, így a koromképződés csökken. Ez a többlet oxigén viszont kevésbé érintkezik a levegő nitrogénjével, mintha az a beszívott levegővel került volna a hengerbe, így a Zeldovich mechanizmust ez kevésbé segíti elő. Az égésfolyamatot mindkét úton bejutó többlet oxigén hasonló mértékben gyorsítja, viszont a motorhajtóanyag oxigénkoncentrációjának extrém növekedése esetén feltételezhetően erre érzékenyebben változna az égéstartam. A vizsgálat összességében kimutatta, hogy az oxigén égéstérbeli elhelyezkedése nagy hatást gyakorol a különböző folyamatok lefutására.

#### Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Szalmáné Dr. Csete Mária vezette OTKA - K21 - 138053- Közúti közlekedési technológiák és beavatkozások fenntarthatósági szempontú életciklus-értékelése c. projekt támogatta. A kutatás az AVL Hungary Kft. támogatásával valósult meg. A szerzők köszönetüket fejezik ki a Karlsruhei Műszaki Egyetemnek a kutatásokhoz kapott Oximetilén éterért.

#### Irodalmi hivatkozások

- [1] Virt M., Zöldy M. *Folyékony hajtóanyagok fejlesztési tendenciái*, Közlekedés és Mobilitás, Közlekedéstudományi Intézet, 2022, 1(1), 14.
- [2] Nyerges Á., Zöldy M. *Alacsony és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés hatásvizsgálata haszonjármű dízelmotoron*, Műszaki szemle, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2018, 71.
- [3] Zeldovich Y. B. *The oxidation of nitrogen in combustion and explosions*, Acta Physicochimica, 1946.
- [4] Parravicini M., Barro C., Boulouchos, K. *Experimental characterization of GTL, HVO, and OME based alternative fuels for diesel engines*, Fuel, 2021, 292, 120177.
- [5] Virt M., Arnold U. *Investigating the Effects of Oxymethylene Ether in a Commercial Diesel Engine*, Cognitive Sustainability, 2022, 1(3).
- [6] Lakshminarayanan P. A., Aswin, S. *Estimation of Particulate Matter from Smoke, Oil Consumption and Fuel Sulphur*, SAE Technical Paper, 2016, 2016-32-0066.
- [7] Haltenort P., Hackbarth K., Oestreich D., Lautenschütz L., Arnold U., Sauer J. *Heterogeneously catalyzed synthesis of oxymethylene dimethyl ethers (OME) from dimethyl ether and trioxane*, Catalysis Communications, 2018, 109, 80–84.
- [8] El-Seesy A. I., Xuan T., He Z., Hassan H. *Enhancement the combustion aspects of a CI engine working with Jatropha biodiesel/decanol/propanol ternary combinations*, Energy Conversion and Management, 2020, Volume 226.
- [9] Pélerin D., Gaukel K., Härtl M., Jacob E., Wachtmeister G. *Potentials to simplify the engine system using the alternative diesel fuels oxymethylene ether OME1 and OME3–6 on a heavy-duty engine*, Fuel. 2020, 259, 116231.