

# PIROLÍZIS TÜZELŐANYAG BEFECSKENDEZÉSÉNEK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

## MATHEMATICAL MODELLING OF THE INJECTION USING TYRE PYROLYSIS OIL

Kondor István Péter <sup>1\*</sup>, Zöldy Máté <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem  
Magyarország

<sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar  
Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2022.2.ENG.001>

---

### **Kulcsszavak:**

Matematikai modell  
Pirólízis tüzelőanyag  
Befecskendezési sugárkép

### **Keywords:**

Mathematical modelling  
Tire pyrolysis oil  
Droplet formation

### **Cikktörténet:**

Beérkezett 2021. október 25.  
Átdolgozva 2022. március 22.  
Elfogadva 2022. április 10.

---

### **Összefoglalás**

A motorizáció fejlődésével napjainkra a járművek száma és ebből következően a járműipari hulladékok mennyisége olyan méreteket ölt, amely a veszélyezteti a környezetet és a jövő generáció életkörülményeit. Az elhasznált gumibroncsok újra hasznosításának egyik ígéretes módja a pirólízis amely során kis energiabefektetéssel gazdaságosan állítható elő magas fűtőértékű tüzelőanyag. Mivel ennek a tüzelőanyag tulajdonságai eltérnek a kereskedelmi forgalomban kapható tüzelőanyagokétól ezért ebben a kutatásban a különböző térfogatszázalékban gázolajhoz kevert gumialapú pirólízis olaj befecskendezési sugárképre gyakorolt hatásainak matematikai modellezése történik.

### **Abstract**

With the development of motorization, the number of vehicles today, and consequently the amount of automotive waste, is reaching dimensions that endanger the environment and the living conditions of future generations. One promising way to recycle used tires is pyrolysis, which can economically produce high-calorific fuel with little energy investment. Because the properties of this fuel are different from those of commercially available fuels, this study mathematically models the different volume percent effects of rubber-based pyrolysis oil on the injection droplet formation.

---

## 1. Bevezetés

Korábbi kutatások alkalmával [1] a különböző térfogatszázalékban gázolajhoz kevert gumialapú pirólízis tüzelőanyag (TPO) befecskendezési sugárképre gyakorolt hatásai lettek vizsgálva szimulációs környezetben AVL Fire szoftverben majd az eredmények validálása történt LDX CR injektor befecskendező próbapadon különböző nyomásértékeken és különböző keverékekkel. A befecskendezési sugárképekről Olympus I speed 3 gyorskamerával felvételek készültek, amelyekből tisztán látszott a sugárkép alakja (1. ábra). A kutatás során megállapítható volt, hogy a sugárkép alakja megváltozik a TPO hozzáadásával, aszimmetrikus alakot ölt fel.

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 30 378 1744  
E-mail cím: kondor.peter@gamf.uni-neumann.hu



1. ábra. A gázolaj sugárképeinek alakulása 350 bar Rail nyomás esetén különböző időpillanatokban

A korszerű magasnyomású Common Rail (CR) diesel befecskendezőrendszerekkel a tüzelőanyag befecskendezési nyomása 700-2500 bar között történik a jobb cseppbontás így tüzelőanyag levegő minél jobb keveredése érdekében [2]. A mérések során alkalmazott injektor egy a járműiparban széleskörben alkalmazott elektromágneses vezérlésű BOSCH CRIN1 típusú injektor. A szimulációk és a validációk során alkalmazott 350 és 1000 báros értékek korábbi kutatások [3] során meghatározott értékek, amely szerint ez a két leggyakrabban használt terheléshez és fordulatszámhoz tartozó nyomásérték az ilyen CR diesel befecskendezőrendszerrel működő dieselmotoroknál. Amennyiben a sugárkép alakja megváltozik, hatással van a levegővel történő keveredésre majd az égés minőségére, következésképpen az emissziós értékekre [4]. Ebben a kutatásban a sugárképek kamerás felvételeinek 3D-s modellezése majd a modellek alapján a különböző térfogatszázalékú keverékek közötti matematikai összefüggések felírása történt. Ezen modell alapján következtetni lehet a keverési arány sugárképre gyakorolt hatására, és segítségével pontosan meghatározhatók a különböző gázolaj-TPO keverékek térfogat, átmérő és felszín tulajdonságai.

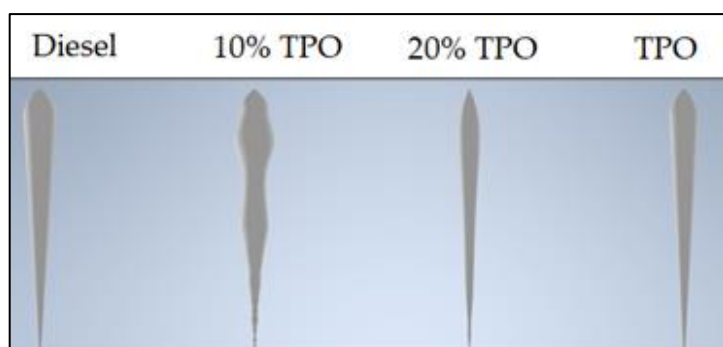
## 2. Sugárképek 3D modellezése

A korábbi kutatások során [5] tisztán gázolaj, majd 10 és 20 térfogatszázalékban pirolízis olajjal kevert gázolaj és tisztán pirolízis olaj lett vizsgálva és gyorskamerás felvételeken rögzítve. A kamerafelvételek alapján méretpontosan be lehetett 3D modellezni a sugárképeket. A gyorskamerával készült sugárképek 3D modellje Autodesk Inventor tervezőprogramban valósult meg, mivel elérhető az egyetemen és az iparban is széles körben használt tervezőprogram. A 2. ábrán a 350 báros befecskendezési sugárképek láthatóak balról jobbra haladva 100% diesel, 10% TPO – 90% diesel, 20% TPO – 80% diesel majd a 100% TPO.



2. ábra. 350 bar Rail nyomású sugárkép 3D modellje 10 tf % TPO hozzáadásával

A 3. ábrán az 1000 bar Rail nyomáson készült 2D sugárképek láthatóak balról jobbra haladva 100% dieselj, 10% TPO – 90% diesel, 20% TPO – 80% diesel majd a 100% TPO.



3. ábra. 1000 bar Rail nyomású sugárképek 2D modelljei

A modellekről a tervezőprogramból a sugárképek átmérőjét, térfogatát és felszínét meg lehetett határozni, amelyek értékeit az 1. táblázat tartalmazza. Az értékekből jól látható, hogy a pirolízis olaj hatása a keverés mértékétől függően különböző értékeket mutat. Az ideális elérni kívánt sugárképprofil a tisztán gázolajjal mért profil mutatja.

1. Táblázat. A sugárképek átmérő felszín és térfogat értékei 350 és 1000 bar Rail nyomásnál

350 bar Rail nyomás	gázolaj	10% TPO	20% TPO	TPO
Átmérők átlaga (mm)	1,779818	1,235090909	0,894636364	1,004545455
Felszín (mm <sup>2</sup> )	289,437	235,931	155,491	162,311
Térfogat (mm <sup>3</sup> )	307,664	208,325	94,561	103,954
1000 bar Rail nyomás	gázolaj	10% TPO	20% TPO	TPO
Átmérők átlaga (mm)	0,978909091	0,849363636	0,558909091	0,793454545
Felszín (mm <sup>2</sup> )	134,177	147,681	87,937	116,846
Térfogat (mm <sup>3</sup> )	70,614	86,093	31,111	53,756

### 3. Matematikai modell

A 3D modellek alapján mért értékek (átmérők átlagolt értékei, felszínek és térfogatok) alapján az

$$y^x = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon \quad (1)$$

modell alkalmazható, ahol:

$x$  – a pirolízis olaj keverék aránya

$y$  – a sugárkép átlagos átmérője/felszíne/térfogata

$\varepsilon$  – hibateg

A legkisebb négyzetek módszere alapján  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  együtthatók értékét az alábbi formula adja:

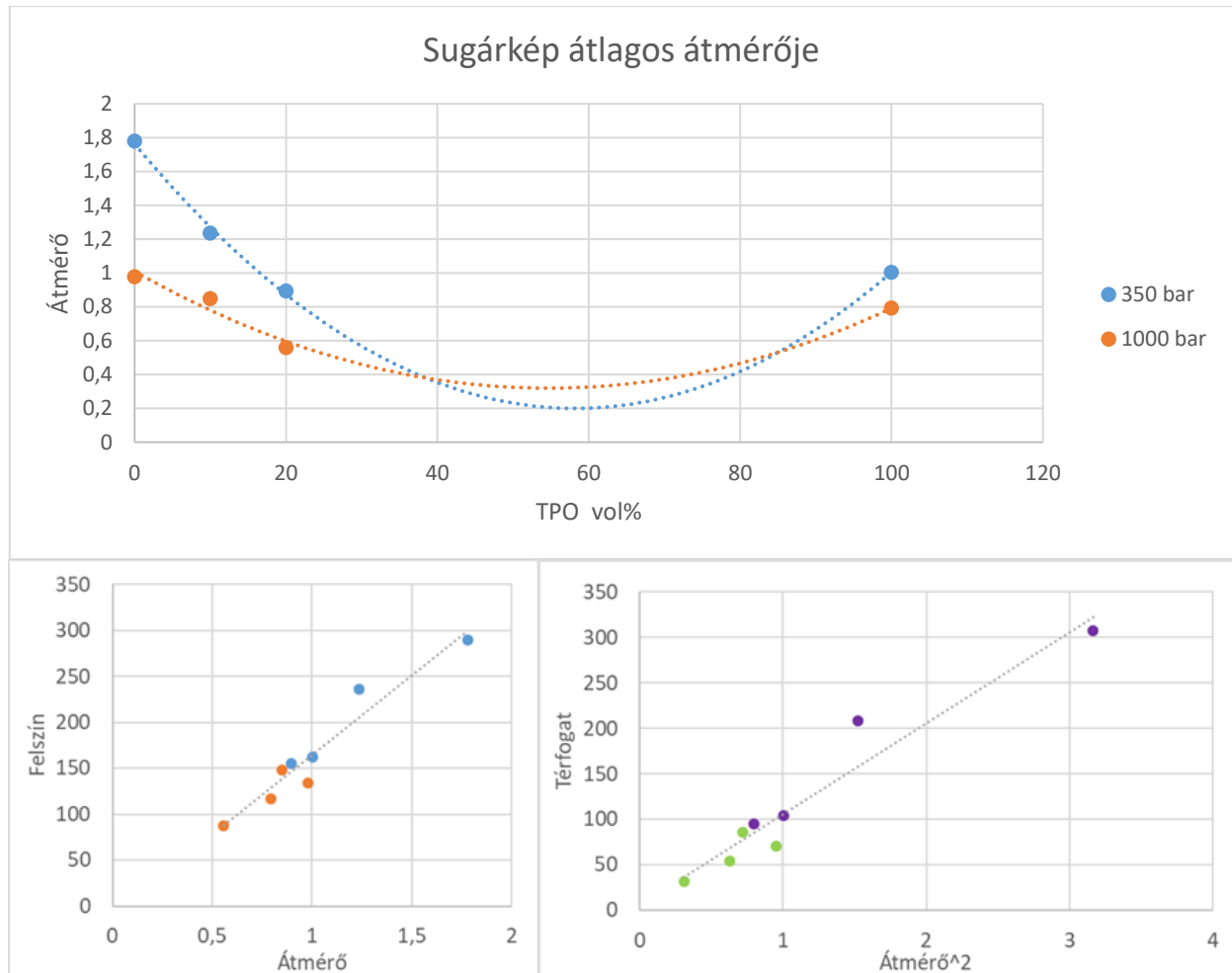
$$\beta = (x^T \cdot x)^{-1} \cdot x^T \cdot y \quad (2)$$

ahol

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}; \quad x = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{pmatrix}; \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

ahol  $n = 4$  (3) ebben az esetben, mivel 2 féle keverési arány (10 tf%, 20 tf%), 100% diesel és 100% TPO lett vizsgálva.

A matematikai modell alapján kiszámolt értékeket és azokból generált függvényeket 350 és 1000 báros Rail nyomás értékeknél a 4. ábra szemlélteti. A 350 báros értékeknél a függvény pontosan megközelíti a validációk során kapott mérési pontokat így nagy pontossággal meghatározható az összes keverési aránynál kialakuló sugárképforma. Az 1000 báros értékeknél némi eltérés mutatkozik a felület és térfogat validációval meghatározott értékei között, de ez nem befolyásolja a matematikai modell alkalmazhatóságát. A diagramokból jól látható, hogy a függvények 50 térfogatszázalékos keverési arányig meredeken zuhannak, majd 50-60 térfogatszázalék körüli értékeknél érik el a minimumot, a függvény inflexiós pontját ahonnan ismét emelkedő tendenciát mutatnak, de a 100 térfogat százalékos TPO értékek nem érik el az etalon üzemanyag (gázolaj) értékeit, hanem alatta maradnak. Az optimális TPO keverési arány magasnyomású befecskendezésnél mindenképpen 10 térfogatszázalék alatti keverési aránynál mutatkozik, itt még minimális eltérés mutatkozik a gázolajhoz képest. Alacsony TPO bekeverési értékek (10% alatti) motorfékpadai mérésekkel is ígéretes eredményeket mutattak emissziós motorkarakterisztikai és motorélettartam szempontjából egyaránt [6]. Az 1000 bar Rail nyomáson vizsgált felület és térfogat ábránkon jól látható hogy a pontok nem esnek rá a függvényre így matematikailag sem közelíthető meg megfelelően ez a két mérés [7]. Ezt az  $R^2$  is alátámasztja mivel ennek értéke 0,5 alatt van tehát a pontosság 50%-nál kisebb. Ebből adódóan nem ez a 2 függvény alapján lehet felállítani a matematikai egyenletet. A diagrammok alapján a valósághoz és a célhoz a matematikai összefüggés felállításához elsősorban az átlagos átmérőkre felállított diagrammok használhatóak, ugyanis ezeknek a legjobb a közelítése valamint az értékek valósághűségére is ebben az esetben lehet a leginkább támaszkodni.



4. ábra. A matematikai modellel meghatározott függvények

## 4. Összefoglalás

Ebben a kutatásban a hulladékalapú tüzelőanyagok, ezen belül a TPO kutatásai során korábban szimulációkkal és validációkkal meghatározott korszerű CR befecskendezőrendszeren Olympus I speed 3 gyorskamerával rögzített befecskendezési sugárképek alapján Autodesk Inventor tervezőprogramban megalkotott 3D modellből létrehozott matematikai modellalkotás történt. A megalkotott matematikai modellel a TPO térfogatszázalékának változására pontos képet kaphatunk a sugárkép alakulásáról, így pontosabban meghatározható az az optimális keverék, amellyel jól megközelíthető az etalon üzemanyaggal, tisztán gázolajjal kialakuló befecskendezési sugárkép. Az elemzések során az volt tapasztalható, hogy az alacsony bekeverési arányban (maximum 10 tf %) közelíti meg a legjobban a függvény az ideális gázolajjal kapott sugárkép profilt. Az eddigi szimulációk, mérések és a matematikai modell egyaránt bebizonyította, hogy az alacsony térfogatszázalékban gázolajhoz kevert TPO ígéretes alternatív tüzelőanyag lehet a közeljövőben kiváltva a növényi alapú tüzelőanyagokat.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Zöldy M, Kondor I. P.: Simulation and Injector Bench Test Validation of Different Nozzle Hole Effect on Pyrolysis Oil-Diesel Oil Mixtures, *Energies* 2021, 14(9), 2396; <https://doi.org/10.3390/en14092396>
- [2] Ahmed I. EL-Seesy, Hidenori Kosaka, Hamdy Hassan, susumo Sato: Combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine and RCEM fueled by n-heptanol-diesel blends and carbon nanomaterial additives. *Energies* 2019, Pages 370-394. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.049>
- [3] Zöldy M: Ethanol – biodiesel – diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines, *Transport* 2010. 26(3), 303-309 <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.623824>
- [4] Anand R., Kannan G.R., Nagarajan S., Velmathi S.: Performance Emission and Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil. SAE 2010 World Congress & Exhibition; <https://doi.org/10.4271/2010-01-0478>
- [5] Kondor I. P.: Gumialapú pirolízis tüzelőanyag injektorokra gyakorolt hatásának komplex értékelése. *Műszaki szemle* 2019. (73), 6–15. Retrieved from <https://ojs.emt.ro/index.php/muszakiszemle/article/view/230>
- [6] Kondor I. P., Zöldy M., Bereczky Á.: Koromkibocsátás vizsgálata pirolízis-diesel tüzelőanyagkeverék alkalmazásánál. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT. 29, (Apr. 2021), 231–234.
- [7] Majerova, J.: Cognitive rationality and sustainable decision based on Maslow's theorem: 2022. A case study in Slovakia. *Cognitive Sustainability*, 1. <https://doi.org/10.55343/cogsust.8>