



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Kandó Kálmán Doktori Iskola

TÜZELŐANYAG BEFECSKENDEZÉS VIZSGÁLATA KOMPRESSZIÓGYÚJTÁSÚ MOTORBAN

Tézisfüzet

Írta:

Vass Sándor

okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Zöldy Máté

tudományos főmunkatárs

Budapest

2020

1 Kutatási célkitűzés

A járművek egyik legfontosabb rendszereleme az erőátviteli rendszer, amely hajtóerőt biztosít egy adott energiaforrásból. Manapság a legelterjedtebb energiaforrásoknak még a kőolaj származékok számítanak. A dízelmotor - mióta Rudolf Diesel szabadalmaztatta több mint százhusz évvel ezelőtt, - nagy fejlődésen ment keresztül és a kezdetektől szerepelt a járművek hajtóegységei között.

A motorfejlesztésben a legfőbb motivációt eleinte a fajlagos teljesítmény és az effektív teljesítmény növelése jelentette, emiatt erjedt el annyira a turbófeltöltés is, hogy manapság szinte kivétel nélkül minden jármű-dízelmotor ilyenekkel készül. Később a mind szigorúbbá váló előírások [1] [2] egyre nagyobb erővel sarkallták a járműgyártókat a belsőégésű motorok károsanyag kibocsátásának csökkentésére, mely a dízelmotoroknál két terület igen jelentős fejlődéséhez vezetett: az első a befecskendező és levegő-előkészítő rendszerek, a második a kipufogógáz-utánkezelő rendszerek. Az előbbi adta jelen munka egyik motivációját is, ugyanis a dízel égésfolyamatok mélyebb megismeréséhez a befecskendező rendszerek és a befecskendezési folyamat megismerésén keresztül vezet az út [3].

Nagy lökést adott a dízelmotorral ellátott gépjárművek elterjedésének a Common Rail (CR) befecskendező rendszerek bevezetése [4]. Ezzel a lépéssel - és modern, jó hatásfokú turbófeltöltők segítségével - a dízelmotorral hajtott járművek egyszerre váltak jelentősen nagyobb teljesítményűvé, rugalmasabbá és takarékosabbá. A CR rendszerek működésének részletes leírásával azonban ritkán találkozunk a szakirodalomban. Modellezésükkel ugyan többen is foglalkoztak [5] [6] [7] [8] [9] [10], fűvóka áramlási viszonyok és a befecskendezési sugár alakulása pedig már régebb óta a kutatások célpontjában volt [11] [12], gyakorlati fontosságához képest azonban nincs még a szükséges mértékben feltérképezve ez a terület. A kutatási munkám kezdetén céltom reakciókinetikai folyamatok feltárása volt, speciális motor üzemállapotokban. Az oda vezető úton azt találtam, hogy mind a befecskendező modellezés, mind a befecskendezési folyamatok mérésében akadtak nem vizsgált témakörök. Véleményem szerint a nyers emisszió csökkentése igen fontos terület a belsőégésű motorok tekintetében, melyre legnagyobb hatással a befecskendezési folyamat változtatásával lehetünk dízelmotorok esetében. Emiatt ma és a jövőben is fontos kutatási téma a befecskendezés, a keveredés, a gyulladás és égés kapcsolata, azaz a dízelmotorok reakciókinetikai folyamatai.

Kutatásaim során dízelmotorok CR porlasztóinak modellezésével, a befecskendezési folyamat lefutásával és mérésével, valamint a befecskendezési sugár, valamint az azt befolyásoló tényezők feltárásával foglalkoztam. Munkám eredményeként előállt egy olyan modellezési és mérési eszköztár, melyeket felhasználva pontosan megjósolható egy befecskendezési folyamat lefutása adott peremfeltételek esetén.

A dízel befecskendezés már régóta kutatott téma Magyarországon is [13], de a CR befecskendező rendszerekkel és a nagynyomású befecskendezéssel, valamint a fűvókageometriák hatásával még senki sem foglalkozott az országban, valamint (a

várakozásokkal ellentétben) a nemzetközi irodalomban sem elterjedt kutatási terület. A rendelkezésre álló információk alapján, azok tovább fejlesztésével létrehoztam saját befecskendező modelletemet, melynek ellenőrzése során hiányosságokat találtam a mérési eljárásban. A hiányosságok feltárása után új módszert dolgoztam ki a befecskendező modellek validálására, melynek segítségével így már megbízható bemenet állítható elő egy égés szimuláció számára.

Egy lépéssel közelítve az égésfolyamatokhoz, a befecskendezési sugár kialakulását tanulmányoztam 3D szimulációk segítségével. A modellezési eljárás során kiderült mekkora hatással van a felépített geometria a sugárképre, így felvetődött a kérdés, hogy különböző geometria-változtatásokkal hogyan lehet befolyásolni a befecskendezési sugarat, ezen keresztül pedig a cseppbomlást és keveredést. Ennek megfelelően módszeresen összehasonlítottam már meglévő és általam kidolgozott, újfajta fűvóka geometriák hatását a sugárképre és ezekből következtetéseket vontam le az egyes geometriai elemek hatásait illetően.

A kutatási munka elején a következő kérdések jártak a szemem előtt:

- Hogyan lehet vizsgálni és modellezni dízel égésfolyamatokat?
- Mi a dízel égésfolyamat legmeghatározóbb eleme?

Rövid kutatás után világossá vált, hogy az égésfolyamatok leírását a befecskendezésen keresztül érdemes kezdeni. Miután erre irányítottam figyelmemet a céloom következő kérdések megválaszolása volt:

- Mi és hogyan befolyásolja a befecskendezési folyamatot?
- Hogyan határozható meg előre egy befecskendezési folyamat?
- Milyen folyamatok zajlanak le egy CR porlasztóban a befecskendezés során és ezek hogyan befolyásolják a befecskendezést magát?
- Hogyan lehet pontosan mérni a befecskendezés lefolyását?
- Hogyan alakul ki a befecskendezési sugár és milyen változók befolyásolják alakját, összetételét?

Ezen kérdéseket próbálva megválaszolni alakultak ki új tudományos eredményeim, melyeket összefoglalva az alábbi téziseken keresztül mutatok be.

2 Új tudományos eredmények

Az alábbiakban összegyűjtöttem a kutatási munka során megfogalmazott téziseimet. A dolgozat releváns fejezete és a kapcsolódó publikációk zárójelben vannak feltüntetve.

1. TÉZIS

Szimulációk és mérések segítségével megállapítottam, hogy a dízel porlasztók befecskendezési tömegáram mérésére jelenleg legelterjedtebben használt, - W. Bosch által kidolgozott - módszer nem adja vissza pontosan a befecskendezési tömegáram lefutás dinamikáját, a mérőberendezés paraméterei pedig döntően befolyásolják a mérési eredményeket. (5. fejezet), [P1, P8]

- a. A mérőcső átmérője és hossza, valamint a csillapító cső átmérője és hossza mind a mérőfolyadék térfogatváltozásán keresztül, a mért nyomáslefutás (és ezen keresztül a tömegáram görbék) dinamikájára hatnak. Minél nagyobb a mérőtér fogat, annál lassabban játszódik le a nyomásnövekedési fázisa a folyadék kompressziós modulusa miatt.
- b. A fojtás keresztmetszetének a szélsőségesen kis keresztmetszetektől eltekintve nincs befolyása a mért tömegáram görbékre.
- c. A rendszernyomás pedig nincs hatással a mért értékekre.

2. TÉZIS

Felépítettem egy új, közepes haszongépjármű első generációs CR befecskendezőjének részletes, kapcsolt elektromágneses, mechanikai és hidraulikus modelljét, kifejezetten a befecskendezési tömegáram és a tüemelés vizsgálatához. A modell egyik újdonsága, hogy tartalmazza a Bosch-féle mérőberendezés elemeit is, így segítségével együtt lehet vizsgálni a porlasztó és a mérőberendezés viszonyát, a mérőberendezés viselkedését. (4. és 5.3.3. fejezetek), [P2, P5, P6, P7]

- a. A modell újdonsága, hogy hibrid: elektromágneses, mechanikai és hidraulikai alrendszerek összekapcsolódást tartalmazza a belső működés leírására.
- b. A modell bemenetei a befecskendező vezérlőárama és a gyújtócső nyomása. Kimenetei a tüemelés és a befecskendezett tömegáram lefutás a fűvókáknál, valamint a számolt tömegáram lefutás a befecskendező mérőberendezésből. Ez utóbbit eddig nem vizsgálták szimulációban.
- c. A modell geometriai paramétereit és a mozgó alkatrészek tömegét mérésrel határoztam meg. Identifikáltam a belső súrlódási viszonyokat és a fűvókák kontrakciós tényezőit.

- d. A modellt széles munkapont tartományban (1,15..2,7 ms nyitási idő, 450..890 bar rail nyomás) validáltam tüemelésre, az eltérés a mért és szimulált görbék között 1 %-on belüli volt, melyre a szakirodalomban eddig nem volt példa.
- e. A modellt alacsony részterheléstől (1,15 ms nyitási időtartam) teljes terhelésig (2,55 ms nyitási időtartam) validáltam befecskendezett dózisa. Az eltérés a mért szimulált értékek között kevesebb, mint 3 % volt.

3. TÉZIS

A 2. tézis alapján kidolgoztam egy új módszert dízel porlasztók befecskendezési tömegáram lefutásának mérésére, mely kombinálja a szimulációs és mért eredményeket. A szimulációs modellben szerepel mind a porlasztó, mind a mérőberendezés részletes modellje, így a mérési eredményeket nem a befecskendező modell kimenetével szükséges összehasonlítani, hanem a szimulációban szereplő mérőberendezés kimenetével. (5.3. fejezet), [P1, P8, P9]

- a. Kimutattam, hogy a porlasztó befecskendezett tömegáram lefutása nem egyezik a mérőberendezés által mutatott görbékkel.
- b. A szimulációs és mérési eredmények összevetésénél pedig az eltérés a nemzetközi gyakorlatban megszokott 10 % alatt volt a szimulált mérőberendezés és a mért adatok között a különböző munkapontokban.
- c. A 2. tézisben szereplő modellt validáltam befecskendezési tömegáram lefutásra is.

4. TÉZIS

Kidolgoztam egy új, a szakirodalomban eddig még nem vizsgált fűvóka geometriát és megvizsgáltam milyen hatással van a befecskendezett sugár alakulására, összehasonlítva két másik fűvóka típus sugárképével. Ezek a hengeres, a kúpos és nagy bemeneti lekerekítésű és egy általam kidolgozott kettős-kúpos, nagy bemeneti lekerekítésű fűvóka geometriák voltak. (6. fejezet), [P3, P4, P10, P11]

- a. A hengeres fűvóka 0,154 mm átmérővel és jelentős kavitációval rendelkező fűvóka furaton belül.
- b. A kúpos fűvókánál a kavitáció elkerülése érdekében 0,04 mm bemeneti lekerekítési sugarat és 1,3 k-faktorú konfúzoros kialakítást alkalmaztam. Ennek hatására a kavitáció megszűnt, a sugárkúpszög jelentősen, 50%-al csökkent, a tömegáram kb. 20 %-al nőtt.
- c. A kettős kúpos fűvóka geometriát úgy terveztem, hogy egyesítse az előző kettő előnyeit. Bemeneti és kimeneti átmérője 0,165 mm,

lekerekítési sugara megegyezik a Ks fűvókáéval, míg legkisebb átmérője megegyezik a Ks fűvókáéval (0,154 mm). A szimulációs eredmények minimális kavitációt, a hengeres fűvókáénál csak 14 %-al kisebb sugárkúpszöveget, de 19 %-al nagyobb tömegáramot mutattak.

A dolgozat eredményeit az alábbi konferenciákon és folyóiratokban mutattam be (zárójelben a vonatkozó tézis szerepel):

[P1] Vass Sándor, Németh Huba: „Sensitivity analysis of instantaneous fuel injection rate determination for detailed Diesel combustion models”, PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 41 : 1, pp. 77-85., 2013. **(T1, T2, T3)**

[P2] Bárdos Ádám, Vass Sándor, Németh Huba: „Validation of a detailed commercial vehicle turbocharged diesel engine model”, A JÖVŐ JÁRMŰVE: JÁRMŰIPARI INNOVÁCIÓ 2014 : 1-2 pp. 25-31., 2014. **(T2)**

[P3] Vass Sándor, Németh Huba: „CFD Modelling of a Common Rail Injector Nozzle, Flow and Spray Characteristics, Validation Using High Speed CCD Camera”, Proceedings of the 14th mini conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies : VSDIA 2014, Budapest, Magyarország, pp. 453-463., 2015. **(T4)**

[P4] Vass Sándor, Németh Huba: „Diesel porlasztó fűvókák geometriai kialakításának hatása az áramlásra, összehasonlítás numerikus szimulációk segítségével”, GÉP LXVIII. : 2, pp. 23-33., 2017. **(T4)**

[P5] Vass Sándor, Németh Huba: „Detailed electromagnetic model of a common rail injector”, 34th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repairing Technologies in Vehicle Industry, Budapest, pp. 165-168., 2017. **(T2)**

[P6] Zöldy Máté, Vass Sándor: „DETAILED MODELLING OF THE INTERNAL PROCESSES OF AN INJECTOR FOR COMMON RAIL SYSTEMS”, JOURNAL OF KONES: POWERTRAIN AND TRANSPORT 25 : 2, pp. 415-426., 2018. **(T2)**

[P7] Vass Sándor, Zöldy Máté: „Detailed Model of a Common Rail Injector”, ACTA UNIVERSITATIS SAPIENTIAE ELECTRICAL AND MECHANICAL ENGINEERING : 11, 2019. **(T2)**

[P8] Vass Sándor, Zöldy Máté: „EFFECTS OF BOUNDARY CONDITIONS ON A BOSCH-TYPE INJECTION RATE METER”, Transport **(T1, T3)**

IF = 1,701

[P9] Vass Sándor, Zöldy Máté: „A MODEL BASED NEW METHOD FOR INJECTION RATE DETERMINATION”, Thermal Science **(T3)**

IF = 1,557

[P10] Vass Sándor, Zöldy Máté: „FÚVÓKAGEOMETRIA HATÁSA A PORLASZTÁSI SUGÁRKÉPRE, DÍZEL PORLASZTÓK FÚVÓKÁINAK CFD SZIMULÁCIÓJA”, OGÉT 2020 **(T4)**

[P11] Vass Sándor, Zöldy Máté: „DÍZEL ÉGÉSFOLYAMATOK VIZSGÁLATA 3D SZIMULÁCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL”, Műszaki szemle 2019/74 **(T4)**

3 Hivatkozások

- [1] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, New York: McGraw-Hill Publishing, 1988.
- [2] T. V. Johnson, „Review of CO₂ Emissions and Technologies in the Road Transportation Sector” *SAE Int. J. Engines*, *SAE Int. J. Engines 3 (1)*, pp. 1078-1098, 2010.
- [3] J. Warnatz, U. Maas és R. W. Dibble, *Combustion*. 2006., New York: Springer Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [4] Bosch Sárga Füzetek, *Common Rail Befecskendező Rendszerek*, Budapest: Bosch Gépjárműtechnika, 2004.
- [5] G. M. Bianchi, S. Falfari, M. Parotto és G. Osbat, „Advanced Modeling of Common Rail Injector Dynamics and Comparison with Experiments,” *SAE Technical Paper Series 2003-01-0006*, 2003.
- [6] S. Brusca, A. Guiffrida, R. Lanzafame és G. E. Corcione, „Theoretical and experimental analysis of diesel sprays behavior from multiple injections common rail systems,” *SAE Technical Paper Series 2002-01-2777*, 2002.
- [7] L. A. Catalano és V. A. Tondolo, „Dynamic rise of pressure in the common rail fuel injection system,” *SAE Technical Paper Series 2002-01-0210*, 2002.
- [8] P. Digesu, A. Ficarella, D. Laforgia, G. Bruni és M. Ricco, „Diesel Electro-Injector: A Numerical Simulation Code,” *SAE Technical Paper Series 940193*, 1994.
- [9] C. Dongovanni és M. Coppo, „Accurate Modelling of an Injector for Common Rail Systems,” *Fuel Injection*, %1. szám ISBN: 978-953-307-116-9, 2010.
- [10] V. Amiola, A. Ficarella, D. Laforgia, S. De Mathhaeis és C. Genco, „A theoretical code to simulate the behavior of an electro-injector for diesel engines and parametric analysis,” *SAE Technical Paper Series 970349*, 1997.
- [11] H. Hiroyasu és M. Arai, „Structures of fuel spray sin Diesel engines,” *SAE Paper 900475*, 1990.
- [12] D. I. Siebers, „Scaling liquid-phase fuel penetration in Diesel sprays based on mixing limited vaporization,” *SAE Paper 1999-01-0528*, 1999.
- [13] D. Brodzki, *Feltöltött Dieselmotorok*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1966.