



KISS CSABA

okleveles gépészmérnök, VMMSzK
 egyetemi tanársegéd, BME

**Emisszió csökkentési technológiák
 a vasúti dízel vontatójárműveken**

Összefoglaló

A dízel-vontatójárművekkel szemben támasztott egyik legfontosabb követelmény a károsanyag kibocsátás csökkentése az egyre szigorodó nemzetközi előírásoknak megfelelően. A közlemény a dízelmotorokon a fenti célok elérését célzó megoldásokat tárgyalja. Végül rövid áttekintést ad az alternatív tüzelőanyagokról és erőforrásokról.

Csaba Kiss
 Dipl.-Ing. Maschinenbau, Assistent an der TU Budapest
 MÁV Zrt. VMMSzK

Technologien für Emissionsreduktion bei Eisenbahn-Dieseltriebfahrzeugen

Zusammenfassung
 Eine der gegen den Dieselmotor gestellten, wichtigsten Anforderungen ist die Reduzierung der Schadstoffemissionen entsprechend der immer verschärfenden, internationalen Vorschriften. Im diesen Artikel werden die diesen Zweck zielenden Lösungen behandelt. Zuletzt eine kurze Übersicht über die alternativen Brennstoffe und alternativen Kraftquellen wird gegeben.

Csaba Kiss
 Msc. mechanical engineer, University instructor
 MÁV Ltd. VMMSzK

Emission reduction technologies for diesel traction vehicles

Summary
 One of the principal requirements addressed to the diesel-powered railway vehicles is the emission reduction corresponding to the even more stringent international standards. The solutions targeting the aforementioned objectives are discussed in the article. Finally a brief overview on the alternative fuels and alternative prime movers are given.

A dízelmotor több évtizedes, mind a mai napig tartó fejlesztése eredményeként a közlekedési eszközök, ezen belül a beépített erőforrással

rendelkező vasúti járművek egyik legmegbízhatóbb és legnagyobb energiahatékonyságú erőforrásává vált. Ugyanakkor az elmúlt időszak-

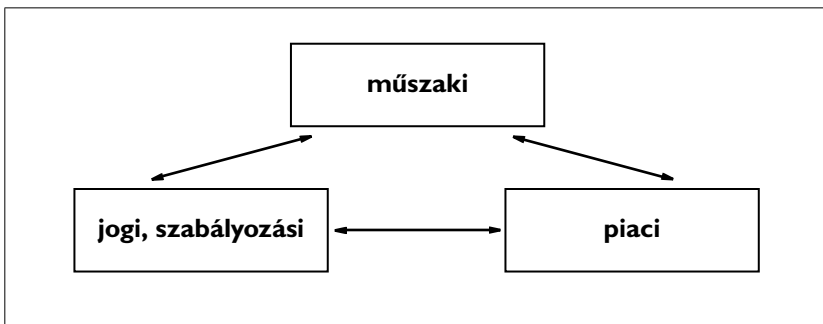
ban újabb követelmények jelentek meg a dízelmotorokkal szemben és a korábbiak is fokozottabb mértékben jelentkeznek.

Mint minden műszaki, energetikai berendezésnél így a dízelmotorok kialakításával és üzemi jellemzőivel kapcsolatosan is a követelményeket három csoportba oszthatjuk, úgymint

- műszaki
- jogi, szabályozási és
- piaci követelmények.

Ezek egymás közötti kapcsolatát az 1. ábra szemlélteti.

A fenti három tényező közül a *műszaki követelmények* a szerkezet kialakítására felhasználható anyagokat, konstrukciós kialakításokat és részleteket, az üzemi paramétereket, a dízelmotor üzem- és segédanyagai-val kapcsolatos előírásokat jelentik.



1. ábra A dízelmotor kialakítását és üzemi jellemzőit meghatározó tényezők és azok egymásra hatása

Bild 1. Die die Konstruktion des Dieselmotors bestimmenden Parameter und ihre Wechselbeziehung

Figure 1. The parameters determining the design and the operational parameters of the diesel engine and their interrelations

Ia. táblázat

Károsanyag kibocsátási határértékek mozdony motorokra

Fokozat	Teljesítmény P_n	NO_x+HC		CO [g/kWh]	PT [g/kWh]	Hatályba lépés
		NO_x [g/kWh]	HC [g/kWh]			
	Lökettérfogat					
IIIA	130-560 kW	4,0		3,5	0,2	2007
	>560 kW	6,0	0,5	3,5	0,25	2009
	>2000 kW $V_l > 5$ liter	7,4	0,4	3,5	0,2	2009
IIIB	>130 kW	4,0		3,5	0,025	2012

Ib. táblázat

Károsanyag kibocsátási határértékek motorkocsi motorokra

Fokozat	Teljesítmény P_n	NO_x+HC		CO [g/kWh]	PT [g/kWh]	Hatályba lépés
		NO_x [g/kWh]	HC [g/kWh]			
	Fordulatszám n_n					
IIIA	>130 kW	4,0		3,5	0,2	2006
IIIB	>130 kW	2,0	0,19	3,5	0,025	2012

A jogi követelmények szabják meg, hogy a dízelmotor tervezése, gyártása és üzemeltetése során milyen szabványokat, előírásokat és normákat kell figyelembe venni. Ide tartoznak többek között az emisszióra vonatkozó szabályozások.

A piaci követelmények egyrészt a gép eladhatóságával kapcsolatos elvárásokat, másrészt a termék versenyképességére vonatkozó igényt továbbá a rendszer fejleszthetőségének tulajdonságát jelenti a változó piaci igényeknek megfelelően.

Mielőtt rátérnénk a címben jelzett téma vizsgálatára a dízelmotor alapvető tulajdonságait az alábbiakban röviden áttekintjük. A dízelmotor

- *kalorikus gép*: a dízelmotorban lezajló energiaátalakulás során termikus folyamatok játszzák a főszerepet;
- *belsőégésű kalorikus gép*: ez azt jelenti, hogy az égés és munkavégzés ugyanabban a térben történik, továbbá a munkaközeg tartalmazza magában a tüzelőanyag-levegő keverék égéstermékait;
- *kompressziógyújtású gép*: más szóval belső gyújtású, tehát a nagymértékben összenyomott levegőbe nagy nyomással befecskendezett tüzelőanyag magától gyullad meg pontosabban azért, mert a levegő hőmérséklete a nagymértékű sűrítés miatt a tüzelőanyag gyulladáspontja fölé növekszik;
- *térfogatkiszorítású gép*: a munkafolyamat során a munkaközeg nyomásból származó energiája a domináns a termikus folyamatokból származó belső energia mellett;
- *lökettüregű gép*: az égésteret határoló mozgó szerkezeti elem a dugattyú alternáló (ide-oda) mozgást végez;
- *minőségi szabályzású gép*: ami azt jelenti, hogy közel állandó mennyiségű levegőbe eltérő mennyiségű tüzelőanyagot fecskendezünk be, ezzel a hengerben kialakuló keverék minőségét változtatjuk.

A vasúti dízelmotor további fontos jellegzetességei, hogy

- üzemállapotuk a teljes üzemidejük során viszonylag tág határok között változik,
- a terhelésváltozások a továbbított vonattól függően gyakoriak és nagymértékűek is lehetnek,
- a kimondottan vasúti üzemre kifejlesztett és gyártott dízelmotorok évi gyártott darabszáma jóval kevesebb, mint egy haszongépjárműé és különösen kevesebb, mint egy gépjármű motoré,
- a dízelmotoros vasúti jármű megbízhatósága szempontjából alapvető fontosságú a hajtó dízelmotor(ok) megbízhatósága,
- az előbbi gondolat miatt a jelentős fejlesztést igénylő, ezért nagy költségigényű, újszerű megoldások időben később jelennek meg a vasúti dízelmotorokon, mint a közúti járművek dízelmotorjain,
- a vasúti járműveket több évtizedre tervezik, így nagyon erős követelményeket támasztanak a

járművek üzemeltetői a dízelmotorok tartóssága tekintetében,

- az előzőek miatt egy vasúti dízelmotor esetében a jelentős fejlesztési lehetőséget kell beépíteni a szerkezetbe, hogy a közeljövő elvárásainak a gép, lehetőleg nagymértékű változtatások nélkül meg tudjon felelni,
 - a vasúti dízelmotorok kimondottan nagy terhelésű gépek, ami azt jelenti, hogy a teljes továbbított vonat tömegének egy tonnájára jóval kisebb dízelmotor teljesítmény jut, mint a közúti járműveknél (például vasúti jármű kb. 1 kW/t, haszongépjármű kb. 10 kW/t, személygépkocsi kb. 100 kW/t).
1. A dízelmotorral, mint a vasúti járművek erőforrásával szemben a következő alapvető követelményeket fogalmazhatjuk meg:
- dízelmotor környezetterhelésének csökkentése
 - emisszió: a dízelmotor károsanyag kibocsátásának csökkentése,

2. a dízelmotor működéséből származó, környezetre gyakorolt zaj mérséklése,
- a dízelmotor működése során keletkező rezgések mérséklése;
- dízelmotor fajlagos teljesítményének (literteljesítményének és tömegteljesítményének) növelése.

Mint ismeretes, a dízelmotor (effektív, főtengelyen leadott) teljesítményét az alábbi összefüggéssel számíthatjuk ki

$$P_e = 2/i \cdot p_e \cdot V_i \cdot n,$$

ahol P_e a dízelmotor effektív (főtengelyen leadott) teljesítménye [kW],
 i a működési elvnek megfelelő állandó (kétütemű, $i=2$, négyütemű $i=4$),
 p_e effektív középnyomás [kPa]
 V_i összlökettérfogat [m³]
 n fordulatszám [1/s].

Az effektív középnyomás a dízelmotor fajlagos hasznos munkáját (az összlökettérfogat egységnyi literéből kinyerhető effektív munkát) adja meg, az összlökettérfogat a munkatér minimális és maximális térfogatai különbségét, a fordulatszám pedig lényegében a munkavégzés sebességét. Tehát azt, hogy a tüzelőanyag kémiai energiája milyen gyorsan, mekkora sebességgel alakul át mechanikai munkává.

Megjegyzés: A dízelmotor literteljesítménye azt mutatja meg, hogy a gép milyen mértékben használja ki a lökettérfogatot a munkafolyamat szempontjából. Ez – mivel térfogat-kiszorítású gépről van szó – fontos jellemző.

A dízelmotor tömegteljesítménye azt juttatja kifejezésre, hogy a beépített szerkezeti anyagokat milyen mértékben használjuk ki.

A dízelmotorok működése során különböző környezetszennyező anyagok keletkeznek, melyeket az alábbi két nagy csoportba lehet sorolni, úgymint

- *globális hatású:* a (CO₂) széndioxid, mely a fosszilis energiahordozók égésének egyik fő terméke és klímaváltozást okozhat az üvegházhatás révén,

- *egészségre közvetlenül ártalmas:* a kibocsátás helyén fejtik ki közvetlenül a hatásukat és ezért a lokális levegőminőséggel kapcsolatosak (nitrogén-oxidok (NO_x), szénhidrogének (HC), szénmonoxid (CO), részecske (PT)).

Az 1. táblázatban összefoglaltuk a dízelmotorok károsanyag kibocsátására vonatkozó fokozatokat, hatályba lépésük idejét, valamint a határértékeket g/kWh mértékegységben.

A táblázat adatait elemezve megállapíthatjuk, hogy a 2012. január 1-én hatályba lépett IIIB fokozat a korábbihoz képest az NO_x+HC-kibocsátás több, mint 50%-os csökkentését, míg a részecske emisszió tekintetében a korábbi szintnek alig több, mint a 10%-ra történő mérséklését írta elő. Emellett fontos megjegyezni, hogy a korábbi szintnél meglévő teljesítmény tartomány, illetőleg az egy henger lökettérfogata szerinti szétválasztás megszűnt.

A bevezetőben említettük, hogy a dízelmotorok környezetre gyakorolt káros hatásai közül a második a zajforrás, melyeknek forrásai a dízelmotorokban a következők

- a levegőellátó- és égéstermelkeztető rendszerben fellépő gázdinamikai folyamatok: ez tulajdonképpen a dízelmotorok levegőellátó- és égéstermelkeztető rendszerében lévő áramlástechnikai gépek és a gyűjtőcsövekben áramló nagy sebességű gázáram által keltett zajt jelenti,
- a hengerben fellépő (égéskor) nyomásváltozás,
- a motor mozgó szerkezeti elemeiből származó szerkezeti zaj.

A dízelmotorok környezetre gyakorolt hatásának harmadik eleme a dízelmotor által keltett rezgések, melyek forrásai a dízelmotor és a környezete kapcsolatán átadódó rezgések (a dízelmotor erőátadásban részt-vevő mozgó szerkezeti elemei és a környezet kapcsolata).

A dízelmotorok környezetre gyakorolt hatásának rövid áttekintése után a dízelmotorok fejlesztési céljait következőképpen lehet megfogalmazni:

1. a dízelmotor CO₂-kibocsátásának csökkentése: említettük, hogy a fosszilis energiahordozók égésének egyik fő terméke a CO₂, így a tüzelőanyag fogyasztás csökkentése mérsékli a széndioxid kibocsátást. Ahhoz viszont, hogy a dízelmotorból a szükséges munkát ki lehessen nyerni kevesebb tüzelőanyagból, az effektív hatásfok növelése szükséges.

Erre vonatkozóan az alábbi két lehetőség kínálkozik, melyeket természetesen célszerű egyidejűleg megkísérelni növelni:

- egyrészt a munkafolyamat indikált termikus hatásfokának növelése: ezzel kapcsolatban megjegyezzük, hogy erre korlátozottan van lehetőség a dízelmotor hengerben lezajló munkafolyamatának optimalizálásával;
 - másrészt a mechanikai összh hatásfok növelése: ez a motor súrlódási veszteségeinek csökkentése és a melléküzemek hajtása teljesítményigényének csökkentése révén lehetséges.
2. a dízelmotorok károsanyag kibocsátásának csökkentése: ezt, amint már említettük, az egyre szigorodó nemzetközi előírások követelik meg. Az e célt szolgáló megoldásokat a következőkben tekintjük át.

A dízelmotorok kipufogógázaiban a CO és a HC viszonylag kicsi, mivel a dízelmotorban viszonylag nagy légfeslelleggel történik az égés. Megjegyezzük, hogy a CO a befejezetlen égés terméke, a HC viszont a tökéletlen égés terméke és származhat a gázolajból, de – inkább – az égéstérbe bejutó kenőolajból is.

A dízelmotorok károsanyag kibocsátásának alapvető problémája a nitrogén-oxidok és a részecske emisszió egyidejű csökkentése, illetőleg a nitrogén-oxid részecske emisszió a fajlagos tüzelőanyagfogyasztás „trilemma” közötti kompromisszum kialakítása.

Dízelmotorok emisszió csökkentési lehetőségei

A dízelmotorok károsanyag kibocsátását a következő fizikai paraméterek befolyásolásával és eszközök alkalmazásával lehet elérni

- a hengerbe bejutó levegő hőmérsékletének csökkentése,
- a nagynyomású tüzelőanyag befecskendezés elektronikus szabályozása beleértve az adaptív (alkalmazkodó) szabályozást,
- égéstér kialakítás áttervezése,
- turbófeltöltés (hibrid, többlépcsős stb.),
- kipufogógáz visszavezetés,
- utánkezelési technológiák, mint a részecskeszűrő és katalizátorok,
- tüzelőanyag paramétereinek változtatása, alternatív tüzelőanyagok és erőforrások használata.

Néhány általános megjegyzés a vasúti dízelmotorok károsanyag kibocsátásának csökkentéséről

A folyamatos konstrukciós javítások ellenére a vasúti dízelmotorok általában jelentősen hozzájárulnak a közlekedés NO_x és PT kibocsátásának mennyiségéhez, valamint a HC és CO emisszióhoz. Ezek azok a károsanyagok, melyek sikeres csökkentését tűzte ki célul a károsanyag kibocsátást szabályozó nemzetközi előírások. Amint már utaltunk rá az egyre szigorodó emissziós szabványok hatályba léptetésétől indítva, a dízelmotor gyártók a technológiák és az irányítás fejlesztésére összpontosít a NO_x , PT és HC csökkentése érdekében és ugyanakkor megpróbálják elkerülni a tüzelőanyag fogyasztás és mechanikai illetve termikus tartósság csökkenése közötti kompromisszumot. Különböző stratégiákat követnek vagy külön, vagy kombinálva őket, mint:

- a levegő- és tüzelőanyag ellátás folyamatának jobb irányítása, hogy olyan feltételeket teremtsenek, melyek korlátozzák az égésből származó káros összetevők keletkezését;
- utánkezelési (vagy égés utá-

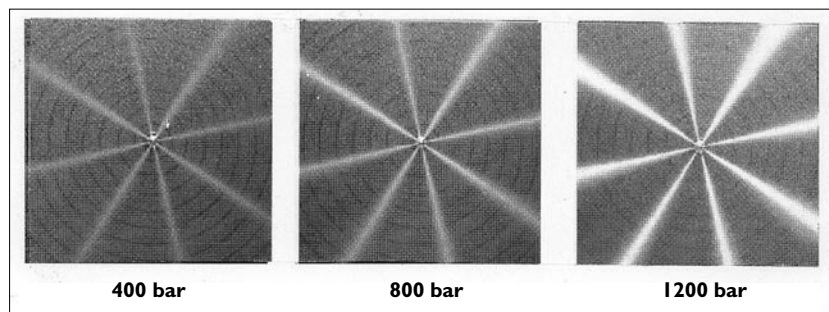
ni) technológiák használata az emissziók leküzdésére vagy leválasztására;

- más lehetséges erőforrások;
- alternatív tüzelőanyagok használatának megfontolása, különösen a lakott területek környéki üzemben;
- további műszaki módosítások szükségesek a jobb tüzelőanyag-levegő égés eléréséhez szükséges fizikai és kémiai folyamatok javításához, különös tekintettel a NO_x képződésre. A NO_x -képződés mértéke exponenciális függvénye az égéstérben fellépő csúcs láng hőmérsékletnek. A láng hőmérsékletet csak a tüzelőanyag tulajdonságai, a levegő kezdő hőmérséklete és oxigén tartalma határozzák meg. Ez azt jelenti, hogy a tervezőnek csak korlátozott eszközök állnak rendelkezésére a hengerben keletkező NO_x -emisszió csökkentésére. További nehézséget jelent, hogy számos intézkedés, mely csökkenti a NO_x -képződést ugyanakkor a PT és a korom növekedésére vezet.
- A turbófeltöltő nyomásviszonyának növelése lehetővé teszi, hogy több levegő álljon rendelkezésre a dízel égésfolyamat hatékonyabbá tételére és így a nagyobb egységnyi elfogyasztott tüzelőanyagra jutó kifejtett teljesítményt eredményez. A levegő visszahűtő hatásosságának növelése, mely hűti a turbófeltöltő és a henger szívócsöve közötti belépő levegőt,

kisebb égési csúcshőmérsékletet és ezzel kisebb képződött NO_x -ot eredményez. Általában nagy teljesítményű, V-hengerelrendezésű motorok több turbófeltöltővel és levegővisszahűtővel rendelkeznek: egy csoport a V-elrendezésű hengerek mindegyik hengersorához. A levegő visszahűtő egy levegő víz hőcserélő, melynek a hűtővizét a mozdony hűtőjéből táplálják. Hatásossága a szerkezetébe foglalt hőcserélő ágak számának illetve a hőcserélő szerkezeti kialakításának, valamint az alkalmazott szerkezeti anyagoknak a függvénye.

- A tüzelőanyag befecskendező a dízeltechnológia alapvető összetevője. Két változatban létezik: mechanikus működtetésű és elektronikus működtetésű. Mindkét változat jelentős, rajta végrehajtott kutatás és fejlesztési erőfeszítésekben részesült. Mivel az elektronikus tüzelőanyag befecskendezést vasúti dízelmotorokban az 1990-es években vezették be, a mozdony motorok jelentős része még mechanikus működtetésű tüzelőanyag befecskendezéssel rendelkezik. Az átalakított, mechanikus működtetésű tüzelőanyag befecskendezők alapvető jellegzetességei magukban foglalják, hogy a gyártók szűkítették az alkatrészek tűréseit keményebb anyagok és áttervezett porlasztócsúcsok használatával.

(Folytatjuk)



2. ábra A porlasztott sugár alakja különböző befecskendezési nyomásoknál

Bild 2. Einspritzstrahl bei verschiedenen Einspritzdrücken

Figure 2. Fuel injection patterns at different injection pressures