

AZ IPARI PNEUMATIKUS MUNKAHENGEREK MECHANIKUS SÚRLÓDÁSÁNAK CSÖKKENTÉSE

MINIMIZATION OF MECHANICAL FRICTION IN INDUSTRIAL PNEUMATIC CYLINDERS

Dr. Szakács Tamás ^{1*}

¹ Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Óbudai Egyetem, Magyarország, <https://orcid.org/0000-0002-7636-7488>

<https://doi.org/10.47833/2025.2.ENG.001>

Kulcsszavak:

pneumatikus hajtás,
pneumobil,
mechanikai súrlódás,
tömítés,
súrlódáscsökkentés.

Keywords:

pneumatic drive,
pneumobile,
mechanical friction,
seal,
friction reduction.

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. május 22.

Átdolgozva 2025. május 26.

Elfogadva 2025. május 28.

Összefoglalás

A pneumatikus hajtású versenyautók, pneumobilok esetében a gyári tömítések által okozott mechanikai súrlódás csökkentése fontos a hajtás hatékonyságának javítása érdekében. Az irodalomkutatás során különböző súrlódáscsökkentési módszereket vizsgáltunk, és a legjobb eredmény elérése érdekében egy olyan saját megoldás mellett döntöttünk, amely az anyag és a geometria módosítására épít. A kutatás során teszteltük a különböző tömítések teljesítményét, mértük a súrlódási veszteségeket, és ellenőriztük a tömítettséget. Eredményeink alapján javaslatot tettünk az optimális tömítés kiválasztására, amely jelentős teljesítménynövekedést eredményezhet a pneumobilok számára.

Abstract

In pneumatic-powered racing cars, specifically pneumobiles, reducing mechanical friction caused by factory-installed seals is crucial for improving drive efficiency. During the literature review, we explored various friction reduction methods and decided on a solution based on modifying both the material and geometry of the seals. We tested the performance of different seals, measured friction losses, and assessed their sealing effectiveness. Based on our results, we propose the optimal seal selection, which could lead to a significant performance increase for pneumobiles.

1. Bevezetés

A pneumatikus hajtású versenyautók, vagy pneumobilok fejlesztése során felmerült, hogy a gyári tömítésekkel szerelt munkahengerek jelentős mechanikai súrlódást generálnak, amely hátrányosan befolyásolja a hajtásrendszer hatékonyságát. E hengerek eredeti tervezése hosszú élettartamra és megbízható működésre irányult, ezért a tömítések robusztus kialakításúak, ami elkerülhetetlenül fokozott súrlódással jár. Ez a súrlódás befolyásolja az energiahatékonyságot, a pozicionálási pontosságot és az élettartamot. Az elmúlt években több kutatás is foglalkozott a súrlódás csökkentésének lehetőségeivel különböző megközelítések alkalmazásával.

Góralczyk et al. (2016) vibrációs alapú súrlódáscsökkentést vizsgált piezoaktív hengerek esetében. A vizsgálat szerint hajlító és hosszanti vibráció alkalmazásával jelentős mértékben

* Dr. Szakács Tamás
E-mail cím: szakacs.tamas@bqk.uni-obuda.hu

csökkenthető a statikus és dinamikus súrlódási erő – akár 66,7%-kal is [1]. Hasonló irányban vizsgálódott Zhang és munkatársai (2023), akik egy új típusú, hosszanti vibrációt használó pneumatikus hengert fejlesztettek ki. Az optimális tömítőbarázda-geometria kulcsszerepet játszott a súrlódás csökkentésében [2]. A kenőanyagok fejlesztése szintén figyelemre méltó irány. Liu et al. (2011) kísérletei során titán-dioxid (TiO_2) nanorészecskékkel dúsított kenőanyagot alkalmaztak, amely bizonyítottan csökkentette a henger belső súrlódását [3]. Vezérlés oldalról megközelítve, egy tanulmány a LuGre-modell alkalmazásával egy új, dinamikus súrlódási modellt használó vezérlő kifejlesztéséről számolt be, amely jelentős javulást eredményezett a pozíciókövetésben [4]. Végül egy másik megközelítés a légcsapágy-technológia alkalmazása volt, amely ultra-alacsony súrlódású működést tett lehetővé, különösen nagy érzékenységgű felhasználások esetén [5].

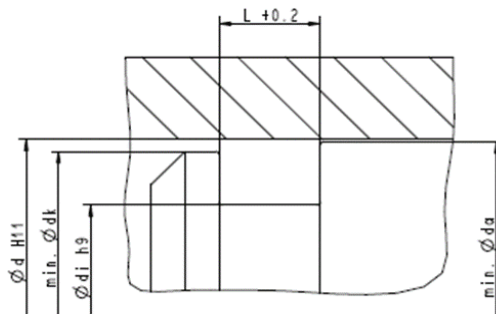
A problémára megoldást keresve, együttműködést alakítottunk ki a Seal-Ring Tömítésgyártó Kft.-vel, amely hidraulikus és pneumatikus hengerek felújítására specializálódott. A cég által alkalmazott eljárás során a meghibásodott hengereket szétszerelik, megméri a kopottság mértékét, majd azt követően a kopás mértékének megfelelően túlméretezött tömítésekkel állítják helyre a hengert. A felújítási folyamat gyorsasága lehetővé teszi, hogy az ügyfél akár egy órán belül megvárja a javítást, mivel a túlméretezett tömítések szükségesek ahhoz, hogy a kopott hengerekben biztosítva legyen a megfelelő tömítés és tartósság.

Ebben a kutatásban azonban éppen az ellenkező megközelítést alkalmaztuk. Célunk az volt, hogy megvizsgáljuk, vajon az eredeti tömítésekhez kisebb méretű és módosított geometriájú tömítések képesek-e biztosítani a szükséges tömítettséget, miközben jelentős mértékben csökkentik a súrlódási veszteséget. Ezzel a megoldással nemcsak a pneumobilok teljesítményének és hatótávolságának növelése vált lehetővé, hanem a mechanikai ellenállás csökkentése révén kevesebb energia vész el a tömítések által okozott súrlódás miatt.

Mivel a vizsgált járművek verseny célú alkalmazásra készülnek, az élettartam nem elsődleges szempont. Ezért elfogadható, hogy a tömítések csupán egyetlen versenyhétvégét bírjanak ki, mivel a tömítéscsere gyorsan és egyszerűen elvégezhető, így a rövidebb élettartam nem korlátozza a tömítések alkalmazhatóságát a versenykörnyezetben.

2. A módosított tömítés tervezése

A pneumobilokban használt pneumatikus munkahengerek dugattyúi szerelt kivitelűek, vagyis olyan tömítés is tervezhető bele, mely összeszereléskor nem szükséges a nagymértékű alakváltozás. A tömítések egy-egy fészekhoronyba ülnek bele, aminek kialakítását az 1. ábra, méreteit az 1. táblázat mutatja.



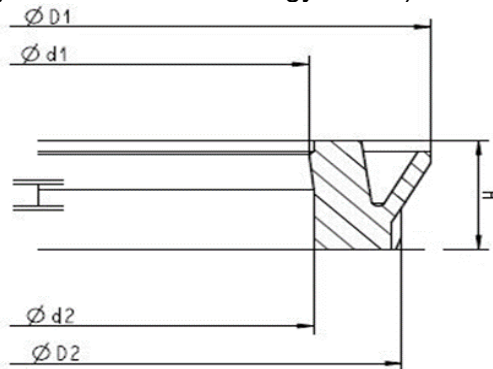
1. ábra Fészekhorony műszaki rajza

1. táblázat Fészekhorony méretei

H	Ød2	Ødi	Øda	Ødk	L
7,0 +0,1/ -0,2	52,53 ± 0,35	53	62,6	58	7,5

A Rexroth Pneumatics Kft három beszállítóval gyártja le a PRA 63-as hengeréhez a dugattyútömítéseket. A három beszállító név szerint a svéd Trelleborg, az amerikai Parker és a német Freudenberg. A három beszállítónak az egri gyár által gyártott fészekbe kell tömítést gyártaniuk, továbbá figyelembe kell venniük a henger belső felületének tűrésezett méretét. A tömítések melyeket a PRA 63-as hengerhez használnak, ajakos kialakításúak.

A Rexroth Pneumatics-tól kapott műszaki rajzok alapján - mely a 2. ábrán látható - megfigyelhetjük, hogy a három gyár egymástól különböző méretekben gyártja le a tömítéseiket. Ezeket a méreteket egymással összevetve az eredeti, és a módosított méreteket 2. táblázatból ismerhetjük meg (A 2. táblázat jelöléseit a 2. ábra magyarázza).



2. ábra Gyári tömítés műszaki rajza

2. táblázat Tömítések méretei [6]

	Tömítés méretei			
Gyártó	ØD ₁ [mm]	H [mm]	Ø d ₁ [mm]	Ø d ₂ [mm]
Trelleborg	64,6 ± 0,35	7,0 ± 0,2	51,7 ± 0,35	nincs megadva
Parker	64,4 ± 0,25	7,0 +0,1 -0,2	nincs megadva	52,35 ± 0,35
Freudenberg	64,9 ± 0,3	7,0 +0,1 -0,3	51,7 +0,2 -0,3	52,4 ± 0,2
	Gyártásra ajánlott tömítés méretek			
Maximum	65,2 ± 0,2	7,0 ± 0,2	51,7 ± 0,2	52,35 ± 0,2
Minimum	64,15 ± 0,2	7,0 ± 0,2	51,7 ± 0,2	52,35 ± 0,2
„Alacsony súrlódású”	63,5 ± 0,2	7,0 ± 0,2	51,7 ± 0,2	52,35 ± 0,2

Mivel az a cél olyan tömítés tervezése, melynek a súrlódása alacsony, ezért azt a méretet kell megváltoztatni, amelyik a munkahenger belső felületével érintkezik. Ez a méret a tömítés külső átmérője a D1. Az eredeti terv szerint három ajakos tömítést gyártattunk volna le olyan módon, hogy a három beszállító által gyártott tömítéseket összevetve, a legnagyobb átmérőjűt alapul véve, beleszámolva a tűrést is, neveztük el Maximumnak. A következőt szintén a beszállítók által gyártottból származtatva, ennél viszont a legkisebb átmérőjűt vettük alapul, és ez a Minimum nevet kapta.

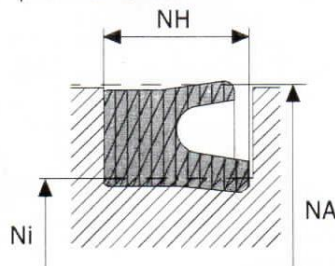
Ezt követően tervezésre került egy olyan változat is, melynek külső átmérője minimálisan nagyobb, mint a henger belső átmérője. Ez a tömítés az „Alacsony súrlódású” nevet kapta. Ezek a tömítések az eredetitől csak méretükben tértek el eddig. Fontos, hogy súrlódás csökkentését nem csak az érintkező felületek csökkentésével lehet elérni, hanem a tapadó felületek anyagának megváltoztatásával is. Mivel a henger belső felületét nem tudjuk megváltoztatni, ezért a tömítés anyagának megváltoztatásával lehet elérni kedvezőbb anyagpárosításokat. A három beszállító PUR-ELASTOMER AU80-T2-MRP1074-WN anyagot használ a tömítések gyártásához. A módosított méretű, és anyagú tömítéseket a Seal-Ring Tömítésgyártó Kft gyártotta le. A cég ajánlásával a 12 féle különböző célra felhasználható minőségi alapanyagból, két féle anyagot választottunk ki a leggyártott tömítésekhez. Az egyik egy NBR 85-ös akrilnitril-butadién-gumi bázisú elastomer anyag melyet az ajakos tömítésekhez használtunk fel. A másik politetrafluoretilén plasztomer anyag fémes töltőanyagokkal, melyet egy O-gyűrűvel kombinált speciális tömítéshez használtunk. A választott anyagok leírását a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat Anyagok leírása [6]

Recosrubber 1 NBR		Recostal POM	
Szín	fekete	Szín	fekete
Keménység	85a5 Shore A	Keménység	68 Shore D
Nyers sűrűség	1,28 g/cm ³	Nyers sűrűség	2,4 g/cm ³
Feszültségérték 100%	9 N/mm ²	Szakítószilárdság	18 N/mm ²
Szakítószilárdság	16 N/mm ²	Szakadási nyúlás	200%
Szakadási nyúlás	140%	Alsó használati hőm.	-200 °C
Nyomási alakváltozási maradék 100°C, 22h	19%	Felső használati hőmérs	260 °C
Tovább szakítási szilárdság	8 N/mm		
Ledörzsölés	130 mm ³		
Alsó használati hőmérs.	-30 °C		
Felső használati hőmérs.	100 °C		

Az anyagok meghatározása után a profilok kiválasztása volt a feladat. A gumis anyag tulajdonságai lehetővé teszik, hogy ajakos tömítéseket gyártunk belőlük. Ugyanis az ajakos tömítések működés közben, vagyis nyomás hatására ráfeszülnek, a tömítendő felületre. A tömítés ajkai kitágulnak és hozzátapadnak a henger falához. Ezt a rugalmasságot a gumis anyag tudja biztosítani. A Seal-Ring ajánlásával az 3. ábrán látható profilból gyárttattunk ajakos tömítéseket.

K 5 Ajakos dugattyú tömítőgyűrű pneumatikához



3. ábra Seal-Ring ajakos tömítésének profilja

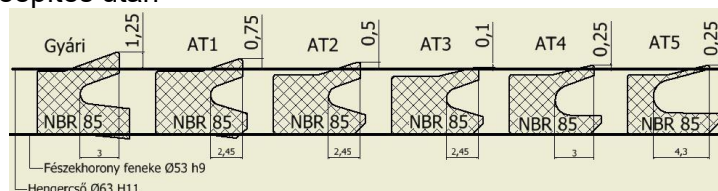
A profilkialakítást követően a méretlánc meghatározása történt meg. A tömítésekből több méretváltozat is legyártásra került, a súrlódás és tömítési jellemzők optimalizálása céljából. Az első tömítés a Seal-Ring Kft. NC-esztergagépének szoftveres méretszámítása alapján készült, amelyhez a horonyfészek és a henger méreteinek megadása történt meg. Ezt a változatot AT1 jelöléssel látták el, és a későbbi változatok ennek geometriájából, úgynevezett kikönnyítéssel lettek kialakítva.

A második tömítés (AT2) az AT1 tömítés külső átmérőjének 63,8 mm-ről 63,5 mm-re történő csökkentésével, valamint a belső átmérő 0,2 mm-rel történő növelésével készült. A belső átmérő módosítása egyben a szerelési állapotban fennálló külső átmérő csökkenését is eredményezte, mivel a horonyfészek átmérője 53 mm, így a tömítésnek kisebb mértékben szükséges kitágulnia. Az AT2 esetében a belső horony letörése is eltávolításra került.

A harmadik tömítés (AT3) kialakítása hasonló elvek szerint történt: a külső átmérő 63 mm-re, míg a belső átmérő 52,8 mm-re módosult. Az ezt követő változatok esetében már nemcsak méretbeli, hanem geometriabeli módosítások is történtek. További külső átmérő csökkentésére nem volt lehetőség, mivel a tömítési funkció veszélybe került volna. Ezért a belső átmérő 0,3 mm-rel csökkentésre került, így 52,5 mm-es értéket ért el. Ezzel párhuzamosan a felső működő ajak vastagsága csökkentésre, míg a beszúrás mélysége növelésre került. Az így kialakított konstrukció rugalmasabb, könnyebb tömítést eredményezett, amely az elvárások szerint kisebb súrlódási erővel működik. Ez a változat az AT4 jelölést kapta.

Az utolsó tömítés (AT5) a korábbi módosításokat követte, azonban a felső ajak még vékonyabb kialakítást kapott, a beszűrás mélysége tovább növekedett. A geometriát tekintve ez a konstrukció már az NC-gép megmunkálási határait súrolta, további méretcsökkentés nem volt programozható. Az AT5 tömítés esetében tehát a legnagyobb mértékű geometriakönnyítés valósult meg.

Összesen öt különböző ajakos tömítés került legyártásra, egységes alapanyagból. A kialakított profilok az 4. ábrán kerülnek bemutatásra, amelyen jól megfigyelhető az egyes tömítések túlfedése a hengerbe történő beépítés után



4. ábra Ajakos tömítések profiljai

2.1. Tömítések mérése

2.1.1. 1. Súrlódásmérés

A mérés célja az Óbudai Egyetemen fejlesztett, a Seal-Ring Kft. által gyártott tömítések súrlódási jellemzőinek meghatározása volt. A vizsgálatokhoz Török Péter [6] által tervezett mérőberendezés került alkalmazásra, amely a Bosch Rexroth Kft. egri gyáregységében került összeállításra. A mérőgép szerkezeti kialakítását, valamint pneumatikus és elektromos kapcsolási vázlatát az 5. és 6. ábrák mutatják be.

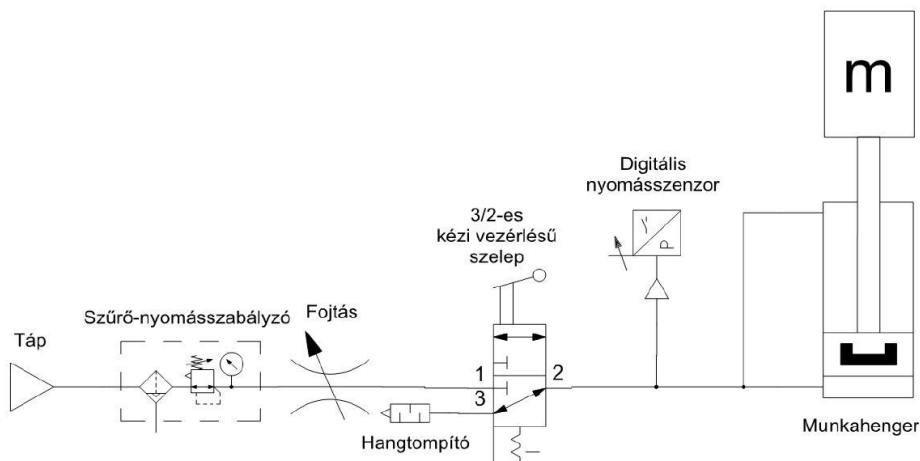
A vizsgálat során különböző terhelések alkalmazásával került meghatározásra az a nyomásérték, amelynél a dugattyú mozgása megindul. A mérésekhez egy Ø63 mm átmérőjű, 100 mm löketű munkahenger került felhasználásra, amely függőleges helyzetben lett rögzítve felfogó talpon keresztül. A löketvégi csillapításokat a munkahengerből előzetesen eltávolították, hogy a mérési eredményeket ne befolyásolja a csillapításból adódó ellenállás.

A sűrített levegő fojtáson keresztül lett bevezetve a munkahenger A és B kamrájába, így biztosítva az azonos nyomásviszonyokat a tömítések mindkét oldalán. A nyomásnövekedés lassítására a fojtás megfelelő beállítása történt, amely a tömeggyorsulás hatásának csökkentését, valamint pontosabb nyomásérték-leolvasást tett lehetővé.

A nyomásértékek rögzítése egy AVENTICS Series PE5 (R412010773) típusú digitális nyomásszenzor segítségével történt, amely $\pm 0,2\%$ -os ismétlési pontosságot biztosított a végértékhez viszonyítva. A mérőrendszer tartalmazott egy 3/2-es kézi működtetésű útváltó szelepet is, amely a munkahenger feltöltését és leürítését tette lehetővé (5. és 6. ábrák). A terhelések különböző tömegű súlyokkal lettek kialakítva, melyeket a 4. táblázat foglal össze.

4. táblázat A terhelő súlyok összefoglaló táblázata

Megnevezés	Darabszám	m (kg)
Dugattyúrúd	1	0,66
Alaptartó	1	4,27
Tárcsa	1	4,56
Nagykocka	2	2,99
Kiskocka	2	1,76
Lezáró kocka	1	3,57
Összesen		22,56



5. ábra: A mérőrendszer kapcsolási rajza



6. ábra Mérőrendszer szerkezeti felépítése [6]

Mérés menete: A hálózati nyomást biztosító légtartály feltöltése után összes súlyt felhelyeztük a munkahengerre, mivel a mérést a maximális terheléssel kezdtük. Ezt követően a hálózati nyomást rákapcsolva, elkezdjük a mérést. A nyomásmérő kijelzőjén figyelve a nyomás emelkedését mindaddig, míg a dugattyú működésbe nem lépett, megállapítottuk a megmozduláshoz szükséges nyomás értékét. Nem csak az a nyomás volt a fontos, mely a dugattyúrúd elindulását okozta, hanem a dugattyú mozgása során leolvasott nyomásérték is rögzítésre került. A két nyomás feljegyzését követően a 3/2-es szelepet átkapcsolva ürítettük le a hengert. Egy súly levétele után a szelepet visszakapcsolva folytattuk a mérést. Ezt a folyamatot egészen addig végezve, míg a dugattyúról az összes súly le nem került. Ezt a mérési folyamatot minden egyes tömítéssel négy ismétléssel végeztük el.

2.1.2. Súrlódásmérés bemutatása és kiértékelés a gyári tömítésen keresztül

Mérés során két nyomást regisztráltunk. Rögzítésre került dugattyút megindító, és a dugattyú mozgás a során mérhető nyomásérték. Az előbbi statikus, az utóbbit dinamikus nyomásnak neveztük el, jelölése p_{Stat} , illetve p_{Din} . A gyári tömítés során a következő értékeket rögzítettük: (5. táblázat).

5. táblázat Gyári tömítés mért adatai [6]

		A gyári tömítés mért adatai							
Tömeg	F _{súlyerő}	p _{Stat}	p _{Din}	p _{Stat}	p _{Din}	p _{Stat}	p _{Din}	p _{Stat}	p _{Din}
(kg)	(N)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)	(bar)
0,66	6,43	1,37	1,32	1,33	1,26	1,37	1,32	1,33	1,26
4,93	48,31	3,05	2,91	3,18	3,12	3,05	2,91	3,18	3,12
6,69	65,58	3,67	3,45	3,65	3,58	3,67	3,45	3,65	3,58
7,92	77,68	4,04	3,77	4,22	4,18	4,04	3,77	4,22	4,18
9,48	93,00	4,87	4,68	4,92	4,84	4,87	4,68	4,92	4,84
11,24	110,26	5,60	5,21	5,74	5,30	5,60	5,21	5,74	5,30
12,47	122,36	6,04	5,80	6,27	6,13	6,04	5,80	6,27	6,13
14,23	139,63	6,94	6,48	7,30	7,19	6,94	6,48	7,30	7,19
15,47	151,72	7,97	7,46	8,35	7,47	7,97	7,46	8,35	7,50
17,23	168,99	8,82	8,14	8,89	8,06	8,78	8,14	8,87	8,06
18,99	186,25	-	-	-	-	-	-	-	-
22,56	221,31	-	-	-	-	-	-	-	-

Gyári tömítésnél, az utolsó két sor azért maradt üresen, mert a dugattyú nem tudta kiemelni a terhelést. A mért eredmények számtani közepeit a 6. táblázat ismerteti.

6. táblázat Mért adatok átlagai és a súrlódási erő [6]

Mért adatok átlagai		Számított súrlódási erő	
p _{Stat}	p _{Din}	F _{sStat}	F _{sDin}
(bar)	(bar)	(N)	(N)
1,35	1,29	35,96	34,08
3,12	3,02	49,50	46,36
3,66	3,52	49,34	44,79
4,13	3,98	52,01	47,14
4,90	4,76	60,70	56,47
5,67	5,26	67,77	54,74
6,16	5,97	70,91	64,94
7,12	6,84	83,94	74,99
8,16	7,47	104,50	82,92
8,84	8,10	108,59	85,35

A táblázatban az átlagok mellett már olvasható a számított súrlódási értékek, mely a következő egyenletből került meghatározásra:

$$p \cdot A = F + F_s \quad (1)$$

Ahol: p = nyomás [bar]

A = nyomott felület [mm²]

F = nyomó erő [N]

F_s = súrlódó erő [N]

A nyomott felületet az alábbi képletel lehet meghatározni:

$$A = \frac{(D^2 - d^2)\pi}{4} [mm^2] \quad (2)$$

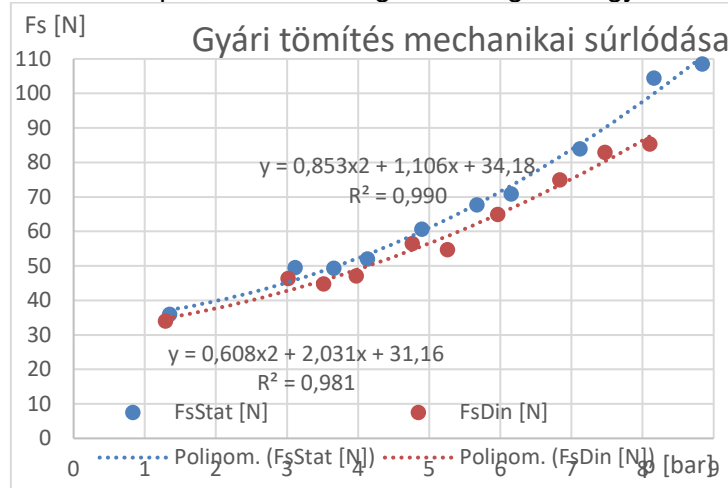
Ahol: D = dugattyúátmérő [mm]

d = dugattyúrúd átmérő [mm]

Abban az esetben, ha az egyenlet két oldala egyenlő, akkor nyugalmi állapotról beszélhetünk. A súrlódóerő mind statikus mind dinamikus esetben következőképpen írható fel:

$$F_s = p \cdot A - F [N] \quad (3)$$

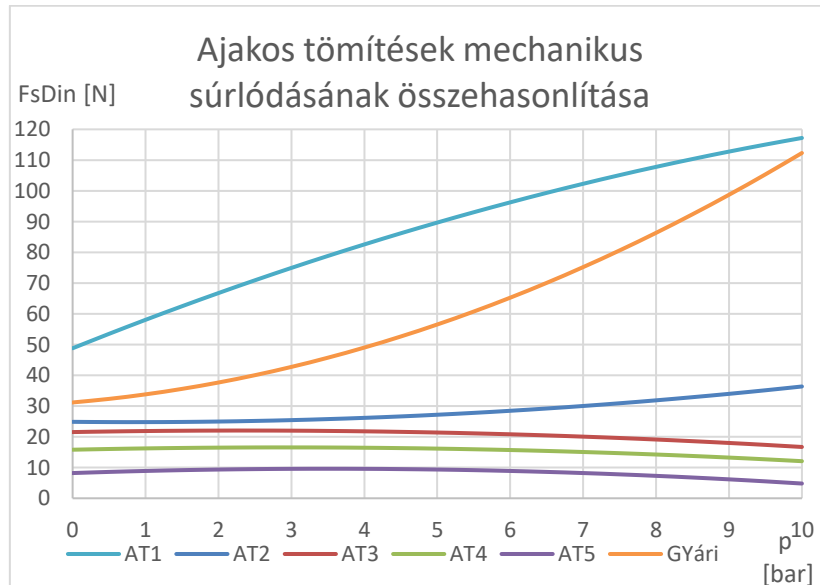
Az számított eredményeket 7. ábra mutatja, ahol az x tengelyen a nyomás és az y tengelyen a hozzá tartozó súrlódóerő szerepel, valamint a regressziós görbe egyenlete is látható.



7. ábra Gyári tömítés súrlódás diagramja [6]

2.2. Ajakos tömítések összehasonlítása

A fenti elv alapján a módosított tömítéseken is elvégeztük a méréseket, mely eredményei a 8. ábrán láthatók.



8. ábra: Ajakos tömítések mechanikai súrlódásának összehasonlítása [6]

A diagram értékelése az AT1-es tömítéssel kezdődik. Ennek a tömítésnek már a beszerelése is nehézségekbe ütközött: a tömítőajkak túl merev kialakítása miatt a hengerbe történő illesztés problémás volt. Kézi működtetés során a dugattyú mozgatása jelentős erőfeszítést igényelt. Ennek

megfelelően, nem meglepő módon, a mért eredmények kedvezőtlenebbek voltak, mint a gyári tömítéssel elérték.

A további tömítések esetében a külső átmérő csökkentésével, illetve a beszúrás mélységének növelésével már kedvezőbb súrlódási jellemzők mutatkoztak. Különösen figyelemre méltó, hogy az AT3-as, AT4-es és AT5-ös tömítések esetében a dinamikus súrlódási erő a nyomás növekedésével csökkenő tendenciát mutatott. Ez rendkívül kedvező tulajdonság, tekintettel arra, hogy a Pneumobil versenyeken a járművek üzemi nyomása jellemzően 8 bar körül alakul.

Ezen üzemi körülményeket figyelembe véve az AT5-ös, vagyis a legnagyobb mértékben könnyített tömítés alkalmazásával mintegy 95%-os javulás volt elérhető. Az AT4-es tömítés esetében is közel 90%-os javulást eredményezett a konstrukció módosítása a gyári tömítéshez képest.

2.3. Tömítések mechanikus hatásfoka

Számított értékekből a tömítések mechanikai hatásfokát is meg lehet határozni. A mechanikai hatásfok azt fejezi ki, hogy az összes – elméletileg rendelkezésre álló – erő mekkora részét tudjuk ténylegesen hasznosítani, figyelembe véve a tömítések súrlódásából adódó veszteségeket.

A mechanikai hatásfok a következő képlettel határozható meg:

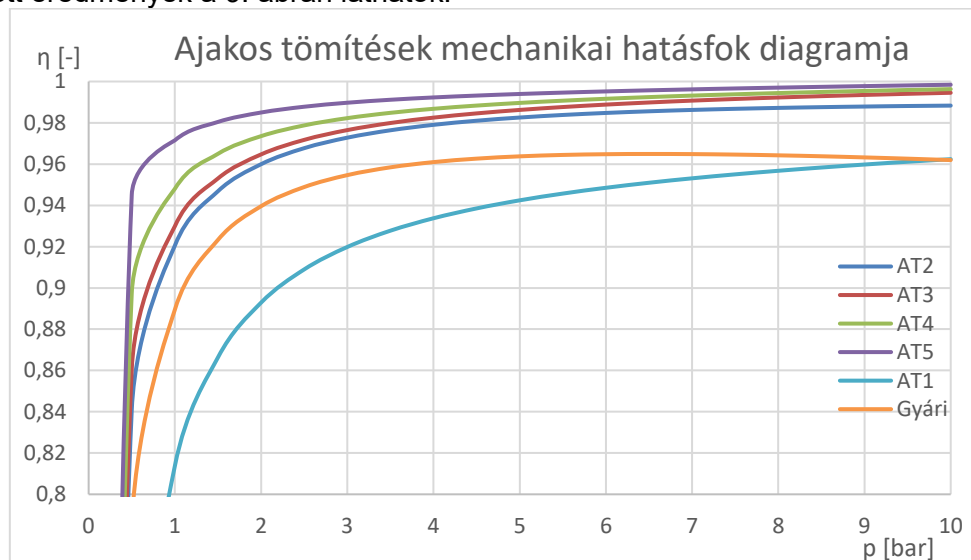
$$\eta = \frac{F_{elm} - F_{SDin}}{F_{elm}} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

Ahol az F_{elm} = Elméleti erő [N]
 F_{SDin} = Dinamikus súrlódás [N]

Az elméleti erőt az alábbi képletből fejezhető ki:

$$F_{elm} = p \cdot A [N] \quad (5)$$

A diagram elkészítéséhez az elméleti erő és a dinamikus súrlódás meghatározása szükséges. Az így kapott eredmények a 9. ábrán láthatók.



9. ábra: Ajakos tömítések mechanikai hatásfoka [6]

A mechanikai hatásfok diagram jól mutatja, hogy a tömítések javításával, folyamatosan csökken a veszteség. Az AT4-es és AT5-ös tömítéssel már közel 100%-os hatásfokot sikerült elérni.

2.4. Súrlódási munka okozta veszteség

Ebben a fejezetben annak meghatározása történt meg, hogy a Pneumobil versenyeken rendelkezésre álló sűrített levegőből nyerhető mechanikai munka hány százalékavész el súrlódási veszteségek következtében. Ezen veszteségek egyik jelentős forrása a dugattyú mozgása során

fellépő súrlódás. A verseny során minden csapat egységesen egy darab, 10 liter űrtartalmú, 200 bar nyomásra töltött sűrített levegős palackot használ energiaforrásként. A járművek üzemi nyomása átlagosan 8 bar körüli értéken alakul.

Az összes vizsgált tömítés esetén kiszámításra kerültek a 8 bar üzemi nyomáson fellépő súrlódási erők, majd ezek alapján meghatározásra kerültek a súrlódási munkák az alábbi összefüggés felhasználásával.

$$Ws = Fs \cdot s_{dugattyú} \quad (6)$$

Ahol a Fs = súrlódási erő [N]
 Ws = súrlódás munkája [Nm]

A súrlódási munkából kaptam meg a súrlódás okozta veszteséget.

$$Ws_{\%} = \frac{Ws}{W_o} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

Ahol a $Ws_{\%}$ = súrlódási munka okozta veszteség [%]

A 7. táblázatban az ajakos tömítések, a 8. táblázatban pedig a csúszó tömítések által okozott veszteségek kerültek kiszámításra. A számítások alapján a legkedvezőbb tömítések alkalmazásával hozzávetőlegesen 2,5%-os javulás került elérésre..

7. táblázat Ajakos tömítések súrlódási munkája okozta veszteség

Ajakos tömítések súrlódási munkája					
Súrlódási erő 8 bar-on (N)		Súrlódás okozta munka (Nm)		Súrlódási munka okozta veszteség (%)	
FS _{GY}	89,1	WS _{GY}	5476,38	WS _{%GY}	2,74
FS _{AT1}	107,8	WS _{AT1}	6622,90	WS _{%AT1}	3,31
FS _{AT2}	31,9	WS _{AT2}	1957,53	WS _{%AT2}	0,98
FS _{AT3}	19,3	WS _{AT3}	1186,01	WS _{%AT3}	0,59
FS _{AT4}	14,0	WS _{AT4}	857,70	WS _{%AT4}	0,43
FS _{AT5}	7,4	WS _{AT5}	452,79	WS _{%AT5}	0,23

3. Szivárgásmérés

A mérések az egri Rexroth Pneumatics gyáregységben kerültek elvégzésre. A méréshez használt berendezést a Bosch Rexroth Kft. tervezte és gyártotta az üzem részére. A próbapad alkalmas a munkahengerek alábbi tulajdonságainak ellenőrzésére:

- Lökethossz
- Mágnes működése
- Szivárgás
- Csillapítás
- Könnyű járás

A vizsgálat célja a tömítések megfelelő működésének igazolása volt a szivárgás mértékének meghatározásával. A mérés előtt a munkahenger típusa (PRA) és főbb méretei (Ø63 mm, 100 mm löket) lézeres kódleolvasóval kerültek rögzítésre. A szükséges cserélhető elemek – mint a levegő-bevezető egységek és a dugattyúrúd-megfogó – a mérés előkészítésekként kicserélésre kerültek. A munkahenger ezt követően függőleges helyzetben került rögzítésre a mérőberendezésen.

A szivárgásvizsgálatot egy Nolek típusú mérőberendezés végezte, amely a kezelőfelületen elhelyezett „Mérés start” gombbal lett aktiválva. A mérés során a dugattyú 5 mm-rel hátrahúzásra került, majd a keletkezett belső tér levegővel lett feltöltve. A berendezés kialakítása lehetővé teszi akár 6000 N-nál nagyobb erők megtartását is, így biztosítva a mérési tér állandóságát.

Az alsó és felső kamrák ellenőrzése után a mért adatok egy ipari PC-re kerültek rögzítésre és automatikusan kiértékelésre. Megfelelőség esetén a kijelzőn zöld „Rendben” felirat jelent meg, a hengert mechanikai jelölés („szúrás”) azonosította, majd a megfogók oldásával és hangjelzéssel

jelezte a gép a henger kivételének lehetőségét. Elutasítás esetén „Hibás termék” felirat jelent meg a kijelzőn. A vizsgálóberendezés felépítését a 10. ábra mutatja be.



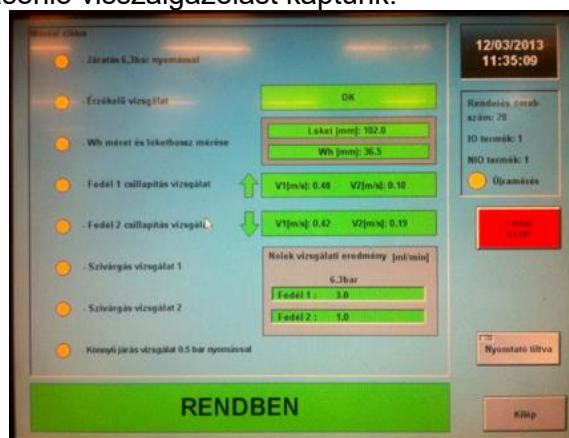
10. ábra VDMA vizsgáló berendezés szerkezeti kialakítása

A mérés eredményét a 9. táblázatban foglalja össze.

9. táblázat Ajakos tömítések szivárgásmérésének eredményét összesítő táblázat

Tömítés megnevezése	Szivárgásmérés	
	Szivárgásmentes	Szivárog
Gyári	+	
AT1	+	
AT2	+	
AT3		-
AT4	+	
AT5	+	

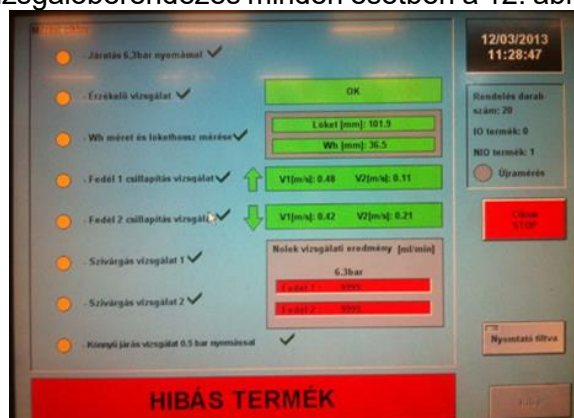
A mérést követően megállapítható, hogy a legtöbb tömítés szivárgásmentesen tömít. A gép kijelzőjén a 11. ábrához hasonló visszaigazolást kaptunk.



11. ábra: Szivárgásmentes tömítés [6]

Külön kiemelést érdemel az AT3-as tömítés, mivel ezzel a típussal szivárgásmentesen tömítés nem volt biztosítható. Ez a tömítés rendelkezett a legkisebb külső átmérővel, amelynek

következtében feltételezhető, hogy a belső nyomás hatására a tömítőajkak nem tudtak megfelelően rásimulni a henger belső palástjára. A tömítés és a henger közötti hézag miatt szivárgás jelentkezett. Többszöri mérés során a vizsgálóberendezés minden esetben a 12. ábrán látható visszajelzést adta



12. ábra: AT3-as tömítés szivárgás mérésének eredménye [6]

4. Következtetések, összefoglalás

A kutatás célja egy olyan dugattyútömítés megtervezése és legyártása volt, amellyel az Óbudai Egyetem Science's Kitchen Pneumobil csapatának járműve jobb eredményeket érhet el a versenyeken. A tömítések tervezése során meghatározásra kerültek a főbb geometriai méretek. Összesen öt darab ajakos tömítés és négy darab csúszótömítés készült el. A csúszótömítések nem teljesítették a tervezett követelményeket, ezért azok nem kerültek bemutatásra a cikkben; eredményeik Török Péter 2014-ben benyújtott szakdolgozatában találhatók meg [6].

A mérési folyamatok ismertetése során a hallgató által tervezett sűrűlődszmérő berendezés működése és az adatok kiértékelésének menete is bemutatásra került. A sűrűlődszmérések során összesen 40 mérés került rögzítésre. A kapott eredmények alapján a kísérleti tömítésekkel a gyári tömítésnél kedvezőbb teljesítmény volt elérhető.

A szivárgásvizsgálat során az öt ajakos tömítés közül egy nem felelt meg a követelményeknek, a fennmaradó négy tömítés viszont szivárgásmentesnek bizonyult. A Pneumobil csapat számára az ajakos tömítések közül az AT4-es és az AT5-ös típusok alkalmazása javasolható.

A kutatás eredményei az ipar számára is hasznosíthatók, gyakorlati alkalmazási lehetőségeket kínálva a pneumatikus tömítéstechnika területén. Az ipari visszajelzések szintjén a Seal-Ring Kft.-vel folytatott együttműködés során kidolgozott tömítésoptimalizálási koncepció beépült a vállalat gyártási gyakorlatába is, továbbá a kutatási együttműködés keretében egy új, tömítéstechnikai megközelítés került tesztelésre mind ipari felhasználás, mind pedig Pneumobil versenycélú alkalmazás tekintetében.

Irodalomjegyzék

- [1] Góralczyk, M. et al. (2016). "Piezoelectric Actuator-Based Friction Reduction in Pneumatic Cylinders". *Sensors and Actuators A: Physical*, 252, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.10.039>
- [2] Zhang, J.-Q., Hu, X.-M., Kang, J.-S., Xiong, F., & Zeng, N. (2017). "Novel Cylinder Movement Modeling Method Based on Aerodynamics". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(5), 1193–1202. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0170-9>
- [3] Liu, Y., Lee, J.-W., & Wang, C.-C. (2011). An innovative design of a measuring equipment and using TiO₂ nanogrease to reduction of friction force for pneumatic cylinder. *Advanced Materials Research*, 317–319, 503–507. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.317-319.503>
- [4] Xuan-Bo Tran Nonlinear Control of a Pneumatic Actuator Based on a Dynamic Friction Model. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. (2021) DOI: 10.5545/sv-jme.2021.7236
- [5] Cao J, Zhu X, Li F, Jin X. Ultra-Low Friction Pneumatic Cylinder Using Air Bearings. *Advances in Mechanical Engineering* (2019). DOI: 10.1177/1687814019839873.
- [6] Török Péter: Szakdolgozat 2014 OE-BGK Hallgatói törzskönyvi száma: 002504/FI38878/B