



Pannon Egyetem
Vegyésszmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

Magnetoreológiai és elektroreológiai elasztomerek tulajdonságainak vizsgálata

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

Balogh Diána
okleveles mezőgazdasági gépésszmérnök

Témavezető:

Dr. Szalai István
egyetemi tanár

2026

Bevezetés

Az anyagtudomány fejlődése az ipari és információs forradalmakat követően új korszakot nyitott, amelyben a modern társadalom működése szorosan kapcsolódik a fejlett anyagok teljesítményéhez és megbízhatóságához. A műszaki és ipari alkalmazások folyamatosan növekvő elvárásai – a nagyobb hatékonyság, az alacsonyabb energiaigény, a költségcsökkentés és a környezetvédelmi követelmények teljesítése – olyan innovatív megoldásokat igényelnek, amelyek túlmutatnak a hagyományos anyagokon. Bár a klasszikus szerkezeti anyagok, mint a vas-, alumínium- és titánötvözetek továbbra is meghatározóak, az elmúlt évtizedekben a kompozit rendszerek iránti érdeklődés jelentősen megnőtt, mivel ezek az anyagok a kedvező mechanikai, fizikai és funkcionális tulajdonságokat egyetlen rendszerben képesek egyesíteni [1].

A modern anyagtechnológia fejlődése egyre inkább az intelligens, adaptív viselkedésű rendszerek irányába mutat. Az olyan anyagok, amelyek külső jeleket „érzékelnek”, és azokra tulajdonságaik módosításával reagálnak, új lehetőségeket teremtenek a szabályozástechnika, a gépészet és a robotika területén. Az elektoreológiai (ER) és magnetoreológiai (MR) folyadékok, valamint az ezekből továbbfejlesztett elektoreológiai és magnetoreológiai elasztomerek (ERE és MRE) különleges helyet foglalnak el ebben a kategóriában. Ezen anyagok működési elve a külső elektromos vagy mágneses tér hatására bekövetkező gyors, akár milliszekundumos időtartamban lezajló szerkezeti átrendeződésen alapul, amely a mechanikai, reológiai vagy funkcionális tulajdonságaik azonnali megváltozását eredményezi [2].

Az ER és MR elasztomerek működési elve a polimer mátrixba ágyazott töltőanyag-részecskék polarizációján, illetve mágneseződésén alapul, amely a belső mikroszerkezet átrendeződését és a makroszkopikus mechanikai válasz módosulását eredményezi. A tér hatására kialakuló lánc- és oszlop szerű szerkezetek jelentős merevségváltozást vagy alakváltozást idézhetnek elő, így az anyag tulajdonságai valós időben hangolhatók. Ez a szabályozhatóság különösen értékesé teszi őket olyan mérnöki rendszerekben, ahol a dinamikus terhelésekhez való alkalmazkodás, a rezgések csillapítása vagy a pontos erőátvitel alapvető követelmény [3–5].

A térre érzékeny elasztomerek alkalmazási területei folyamatosan bővülnek. A gépészeti és járműipari rendszerekben adaptív rezgéscsillapítók, állítható merevségű felfüggesztések és aktuátorok formájában jelennek meg. A robotikában a szabályozható rugalmasság és csillapítás új lehetőségeket teremt. Az épületgépészetben és szerkezetépítésben a rezgéskontrollal ellátott rendszerek fejlesztése napjaink feladata. Emellett a finommechanikai, orvostechikai és aktuátor-technológiák is profitálnak a gyors válaszidejű, kis energiaigényű és jól integrálható anyagokból [6–8].

Célkitűzés

Az elektorreológiai (ER) és magnetoreológiai (MR) elasztomerek alkalmazhatóságát alapvetően meghatározza a kompozit szerkezete, a töltőanyag tulajdonsága és a külső térrel való kölcsönhatás. A kutatás célja azoknak a paramétereknek a feltárása, amelyek a térre érzékeny elasztomerek mechanikai és funkcionális viselkedését döntően befolyásolják.

A kísérleti munka során három fő cél került kitűzésre:

1. Izotrop magnetoreológiai elasztomerek mágneses tér hatására bekövetkező alakváltozásának kvantitatív vizsgálata különböző töltőanyag-típusok és koncentrációk alkalmazásával. A vizsgálat során a deformáció mértékének és irányának meghatározása.
2. Különböző töltőanyag-előkezelési módszerek és mágneses tér orientációk alkalmazásával előállított izotrop és anizotrop henger alakú magnetoreológiai elasztomer minták torziós rugalmassági modulusának meghatározása.
3. Elektorreológiai izotrop elasztomer minták deformációjának vizsgálata külső elektromos tér hatására és a deformáció mértékének meghatározása

Kísérleti munka

Az első kutatási területemként polidimetil-sziloxán alapú, izotrop magnetoreológiai elasztomer korongok viselkedését vizsgáltam különböző töltőanyagokkal - kétféle magnetit és vaspor – és különböző szemcseméret-eloszlással állandó mágneses térben. A mérőrendszer mikroszkópkamera segítségével mérte a korongok alakváltozását. Az alakváltozás pontos mértékét képfeldolgozással, a korongok kontúrvonalának vizsgálatával határoztam meg.

A második kutatási részben a szilikongumi mátrixokból és stabilizált vas nanorészecskékből álló magnetoreológiai elasztomerek torziós rugalmassági modulusát vizsgáltam. Izotrop és anizotrop mintákat készítettem különböző töltőanyag-előkezelési módszerek és mágneses tér orientációk alkalmazásával. Összeállításra került egy mérőrendszer az izotrop és anizotrop minták torziós rugalmassági modulusának vizsgálatára.

A harmadik kutatási területem a töltőanyag koncentrációjának hatásának vizsgálata volt, különös tekintettel a részecskék perkolációjára, az izotrop, korong alakú, bárium-titanát töltőanyaggal ellátott elektorreológiai elasztomerek térindukált alakváltozására.

Új tudományos eredmények, tézisek

1. Polidimetil-sziloxán alapú lapos, korong alakú magnetoreológiai elasztomerek viselkedését vizsgáltam különböző töltőanyagokkal (kétféle magnetit és vas) és izotrop illetve anizotrop eloszlásban, állandó mágneses térben. (Vonatkozó publikációk: [C1], [K1], [K2])
 - 1.1. Korábbi szakirodalmi elméleti szimulációk eredményei alapján a magnetoreológiai elasztomerek deformációjának előjele függ a geometriai testek méretarányától. Kísérleti eredményeim alapján megállapítottam, hogy az összes vizsgált mintánál a méretarányoknak megfelelően (lapos korongok 0,47-es magasság-szélesség aránnyal), a mágneses tér irányában dilatációt lehetett megfigyelni, ami alátámasztja az elméleti eredmények jöslatait.
 - 1.2. Megállapítottam, hogy a töltőanyag koncentráció növekedésével lineárisan növekedett a deformáció mértéke a magnetit és a vas töltőanyagok esetén. Azonban, ha egyéb szennyezőanyagok vannak jelen a magnetitben (amik gátolják a polimerizációt) az jelentősen befolyásolja a deformáció mértékét. A szennyezőanyagok okozta gátolt polimerizáció által megváltozik a mátrix rugalmassága.
2. Polidimetil-sziloxán alapú, töltőanyagként vasat tartalmazó, henger alakú magnetoreológiai elasztomerek torziós modulusát vizsgáltam tér nélkül és állandó mágneses térben. Mértem a mágneses tér hatására bekövetkező MR-effektusként értelmezhető torziós modulus változást. A töltőanyag izotrop illetve anizotrop eloszlású volt. (Vonatkozó publikációk: [C2], [K3])
 - 2.1. A töltőanyag részecskemérete és eloszlása jelentősen befolyásolta a minták mechanikai viselkedését. A részecskeméretet az őrlési idővel befolyásoltam. A kisméretű, homogénebb eloszlású részecskéket tartalmazó elasztomer torziós rugalmassága kisebb volt.
 - 2.2. A töltőanyag koncentrációjának növelése mindhárom esetben növelte az MR effektus mértékét, amely a keresztirányú láncokat tartalmazó minták esetén jelentősen nagyobb volt. Ez arra utal, hogy a keresztirányú láncokat tartalmazó minták esetén a kialakult láncok jobban gátolják a deformációt. Megállapítottam, hogy a keresztirányú láncokat tartalmazó mintákban geometriai okok miatt nagyobb a láncsűrűség, mint a hosszirányban láncos minták esetén, ami erősebb dipólusos lánc-lánc kölcsönhatást eredményez, s ez növeli a torziós moduluszt.
 - 2.3. A MR-effektus tapasztalható volt az izotrop és a hosszirányú láncokat tartalmazó minták esetén is, de az utóbbi esetben nagymértékben függött az őrlési időtől is.
3. Korong alakú (1:3,5 méretarány), PDMS alapú elektoreológiai elasztomereket különböző BaTiO₃ öltőanyag-tartalommal szintetizáltam, és tanulmányoztam a deformációjukat axiális elektromos térben. (Vonatkozó publikációk: [C3], [K4], [K5])
 - 3.1. Megállapítottam, hogy a kialakított ERE testek az elektromos tér iránya mentén - tengelyükkel párhuzamosan – reverzibilisen összehúzódtak. Az összehúzódás nagysága az elektromos térerősséggel négyzetesen változik a kis elektromos tereknél ($\sim 0,2 \text{ MVm}^{-1}$), ami nagyobb térerősségnél ($\sim 1 \text{ MVm}^{-1}$) telítésbe megy át.

- 3.2.** Megállapítottam, hogy az elektromos tér által kiváltott deformációs választ nagymértékben befolyásolja a perkolált részecskeszerkezet jelenléte. A vizsgált BaTiO₃ részecskék perkolációs küszöbe az egyenáramú fajlagos vezetés szerint $c_c = (34,7 \pm 0,1) \text{ m/m\%}$ ($7,9 \text{ V/V\%}$) volt. A részecskeszerkezet változását közvetlenül a perkolációs küszöb körül SEM-felvételekkel igazoltam. Kimutattam, hogy a perkolációs küszöbérték felett az elektromos tér által kiváltott összehúzódás nagysága ~ 10 -szeresére nő az alacsony térerősségű tartományban ($E \approx 0,2 \text{ MVm}^{-1}$). Megállapítottam, hogy nagy térerősségen a perkolációnak nincs jelentős hatása a kontrakció nagyságára. Ekkor a részecske-koncentrációtól függetlenül minden mintánál közel azonos volt a maximális deformáció (1,2%).
- 3.3.** Az eredmények alapján megállapítottam, hogy kis térerősség mellett töltőanyag-koncentráció optimalizálásához a perkolációs küszöbértéket el kell érni, ahol a deformáció azonos térerősség mellett jelentős mértékben nő (~ 10 -szeresére). A perkolációs küszöbérték felett azonban a töltőanyag-koncentráció további növelése már nem okoz nagyobb deformációt.

Tézispontok alapjául szolgáló tudományos publikációk, előadások és poszterek

[C1] **Balogh, D.**; Guba, S.; Horváth, B.; Szalai, I.: Magnetic Field-Induced Deformation of Isotropic Magnetorheological Elastomers, *Magnetochemistry* 8 (2022) 146. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry8110146>.

[C2] **Balogh, D.**; Guba, S.; Szalai, I.: Studies on torsion moduli of magnetorheological elastomers, *Hungarian Journal of Industry and Chemistry* (megjelenés alatt)

[C3] Horváth, B.; Guba, S.; **Balogh, D.**; Jakab, M.; Szalai, I.: Effect of percolation on the deformation of isotropic electrorheological elastomers under external electric fields, *Journal of Molecular Liquids* 390 (2023) 123046. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123046>.

[K1] **Balogh, D.**; Szalai, I.: Magnetoreológiai elasztomer korongok külső mágneses tér hatására történő relatív megnyúlásának vizsgálata In: XXII. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXXI. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia Kolozsvár, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2021) pp. 99-104. , 6 p.

[K2] Guba, S.; **Balogh, D.**; Horváth, B.; Szalai, I.: Mágneses kompozit elasztomerek készítése és mechanikai vizsgálata (2017) Konferencia: OGÉT 2017, XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, 25th International Conference on Mechanical Engineering, Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2017.04.27-2017.04.30., Megjelenés: Románia,

[K3] Guba, S.; **Balogh, D.**; Horváth, B.; Szalai, I.: N-ZVI tartalmú kompozit elasztomerek vizsgálata In: Bíró, Károly-Ágoston; Sebestyén-Pál, György (szerk.) ENELKO 2017 : XVIII. Energetika-Elektrotechnika Konferencia: SzámOkt 2017: XXVII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Kolozsvár, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2017) 255 p. pp. 50-55., 6 p.

[K4] **Balogh, D.**; Szalai, I.: Elektoreológiai elasztomer korongok külső elektromos tér hatására történő deformációjának vizsgálata, In: Sebestyén, György; Szabó, Loránd (szerk.) XXI. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXX. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2020)2 p. pp. 1-4., 4 p.

[K5] **Balogh, D.**; Szalai, I.: Elektoreológiai elasztomerek rugalmassági tulajdonságainak optikai vizsgálata, In: Barabás, István (szerk.) OGÉT 2019: XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, Nagyvárad, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2019) 632 p. pp. 31-34., 4 p

Egyéb tudományos publikációk, előadások

1. Mester, S.; **Balogh, D.**; Szalai, I.: Z generációs tanulási és vizsgázási szokások feltérképezése, In: XXV. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXXIV. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia = Enelko – 25th International Conference on Energetics-Electrical Engineering SzámOkt – 34th International Conference on Computers and Education, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2024) pp. 109-114., 6 p.
2. **Balogh, D.**; Mester, S.; Szalai, I.: Kooperatív projektek bevezetése tesztmérnök szak oktatásába, In: XXIV. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXXIII. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia, Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2023) 201 p. pp. 89-94., 6 p.
3. **Balogh, D.**; Mester, S.; Nagy, R.; Kocsor, P.; Vörös, B.; Szalai, I.: Gépjármű gyalogossal való ütközése a gyalogos tesztbábu szempontjából, In: Sebestyén-Pál, György; Szabó, Loránd (szerk.) ENELKO 2022, XXIII. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXXII. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia, (2022) 210 p. pp. 1-6., 6 p.
4. Mester, S.; **Balogh, D.**; Szalai, I.: Gördülési súrlódási együttható mérésére alkalmas készülék fejlesztése, In: Sebestyén-Pál, György; Szabó, Loránd (szerk.) ENELKO 2022, XXIII. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXXII. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia, (2022) 210 p. pp. 36-40., 5 p.
5. Nagy, S. ; **Balogh, D.** ; Szalai, I. : Viscosity and self-diffusion coefficient of dipolar liquids, Fluid Phase Equilibria, 509 Paper: 112442 , 9 p. (2020)
6. Soós, P. ; Fülöp, I. ; Szüle, Zs. ; Petróczki, K.; Hentz, K. ; **Balogh, D.**; Nagy, Z.;; Szemcsés anyagok áramlástan paramétereinek meghatározása: (2001. évi zárójelentés) (2001), OTKA jelentés, Szent István Egyetem, Gödöllő, Gépészmérnöki Kar, Géptani Intézet, OTKA nyilvántartási szám: TO-25368, Tudományterület: Agrár-műszaki, Időtartam: 1998-2000,

Irodalmi hivatkozások

- [1] Z. Kolozsváry, Az anyagtudomány és a negyedik ipari forradalom összefüggései, AMT 2 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.33923/amt-2019-01-01>.
- [2] M. Zrínyi (2004): Intelligens lágy anyagok. Intelligent soft materials. NKFP 3/043-as pályázat. Szakmai zárójelentés [online]. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- [3] M.R. Jolly, J.D. Carlson, B.C. Muñoz, T.A. Bullions, The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 7 (1996) 613–622. <https://doi.org/10.1177/1045389X9600700601>.
- [4] J.M. Ginder, S.M. Clark, W.F. Schlotter, M.E. Nichols, Magnetostrictive phenomena in magnetorheological elastomers, Int. J. Mod. Phys. B 16 (2002) 2412–2418. <https://doi.org/10.1142/S021797920201244X>.
- [5] S.R. Kumbhar, S. Maji, B. Kumar, Development and Characterization of Isotropic Magnetorheological Elastomer, Ujme 1 (2013) 18–21. <https://doi.org/10.13189/ujme.2013.010103>.
- [6] G.Y. Zhou, Z.Y. Jiang, Deformation in magnetorheological elastomer and elastomer–ferromagnet composite driven by a magnetic field, Smart Mater. Struct. 13 (2004) 309–316. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/2/009>.
- [7] K.A. Kalina, P. Metsch, J. Brummund, M. Kästner, A macroscopic model for magnetorheological elastomers based on microscopic simulations, International Journal of Solids and Structures 193–194 (2020) 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.02.028>.
- [8] X. Dong, C. Niu, M. Qi, Electrorheological Elastomers, in: N. Cankaya (Ed.), Elastomers, InTech, 2017. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68396>.