



NYÍREGYHÁZI EGYETEM
MŰSZAKI ÉS AGRÁRTUDOMÁNYI INTÉZET
NYÍREGYHÁZA



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**BEFŐTTESGUMI NYÚJTÁSI DIAGRAMJÁNAK VIZSGÁLATA A
FIZIKAÓRÁN**

**INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN DIAGRAM OF
RUBBER BANDS IN THE PHYSICS LESSON**

Készítette: Gombosné Kovács Kinga

**Konzulens: Dr. Beszeda Imre főiskolai tanár és Dr. Stonawski Tamás főiskolai
docens**

NYÍREGYHÁZA

2024. 11. 22.

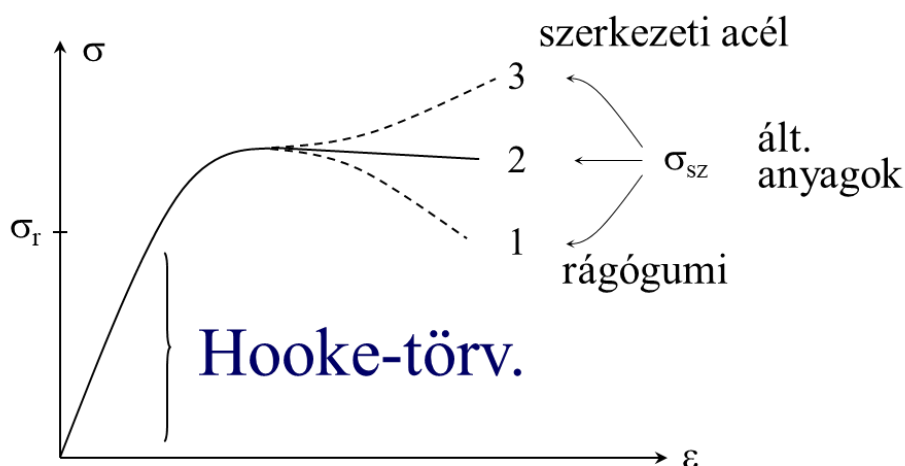
Befőttesgumi nyújtási diagramjának vizsgálata a fizikaórán

Szerző: Gombosné Kovács Kinga, fizikatanár szakos hallgató, levelező 2. évf.

NYE-MATI, Műszaki Alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológia Intézeti Tanszék

Konzulens: Dr. Beszedá Imre, főiskolai tanár és Dr. Stonawski Tamás főiskolai docens

Az anyagok húzóterhelésekor az anyagok megnyúlnak. Az, hogy milyen mértékben az a terheléstől függ. Kis terhelés hatására az alakváltozás rugalmas, míg ha nagyobb a terhelés, akkor maradandó az alakváltozás, majd ha még tovább terheljük az anyagot, akkor szakadás következik be. Azt tudjuk, hogy a mindennapi életben használatos technikai anyagok (mint például a fémek, és elsősorban az acélok) esetében a nyújtási diagram az ábrán mutatott 2-es és 3-as görbe szerint viselkednek.



Az ilyen vizsgálatokat hagyományosan szakítógéppel szokták elvégezni.

Vannak azonban olyan anyagok, melyek a mérnöki gyakorlatban nem használatosak, viszont a hétköznapi életben találkozhatunk velük, mint pl. a gumi (befőttesgumi, modellgumi, kalapgumi, stb...). Ezek viselkedése eléggé eltér a fentebb említettektől, de az iskolában, akár a fizika-, a technika- vagy a komplex természetismeret órán a diákok számára projektfeladatként kitűzhető. Törpe szakítógéppel végzett mérések mellett saját összeállítású mérőberendezést is felhasználva, rugós erőmérővel mértük a befőttesgumi nyúlását a hőmérséklet függvényében. A kapott nyújtási diagramokat ábrázoltuk, a méréseket kiértékeljük, és az irodalomban fellelhető adatokkal összevetettük.

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés	4
Témafelvetés	8
Anyag és módszerek	15
Eredmények és azok áttekintése	18
Következtetések és javaslatok.....	36
Összefoglalás	38
Köszönetnyilvánítás	40
Irodalomjegyzék.....	41
Mellékletek.....	42

BEVEZETÉS

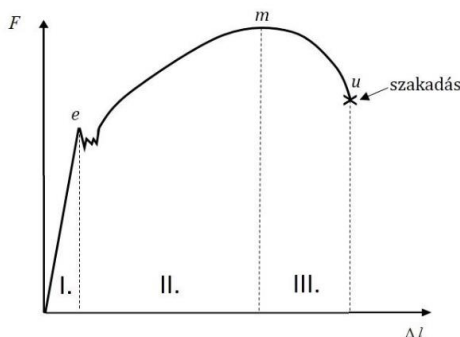
Elméleti háttér

Fizika tanárként nem csak fizika órákat, hanem fizika szakkört is tartok. Erre a szakkörre olyan diákok járnak, akik érdeklődnek a fizikamérések és kísérletek iránt. Az iskolai oktatásból sok esetben hiányzik a gyakorlat. Az óráimat próbálom gyakorlatiassá tenni, mert azt vettem észre, hogy jobban érdekli a tanulókat, mint az elméleti rész. Az egyik szakköri foglalkozás témája a befőttesgumi nyújtási diagramjának vizsgálata volt.

A méréseket rugós erőmérővel végeztük el mérőszalag mentén több tanuló bevonásával szakköri keretek között. A mérést megelőzte az elméleti rész megbeszélése, vagyis a következőkben leírtakat mondtam el a tanulóknak:

Amennyiben két ellentétes irányú, azonos nagyságú közös hatásvonalú erő hat egy testre, akkor a test megnyúlik [1]. A nyújtáskor bekövetkező alakváltozás a relatív megnyúlás, amely a megnyúlás és az eredeti hosszúság hányadosaként értelmezett fizikai mennyiség. Jele: ε , kiszámolása $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$, ahol ℓ az eredeti hossz, $\Delta \ell$ a hosszváltozás. Rugalmas feszültségnek nevezzük az alakváltozást okozó erő nagyságának és a test keresztmetszetének a hányadosaként értelmezett fizikai mennyiséget. Jele: σ , kiszámolása: $\sigma = \frac{F}{A}$, F a megnyúlást okozó erő, A a teherviselő keresztmetszet jele. A rugalmas feszültség mértékegysége $\frac{N}{m^2} = Pa$.

A feszültség és a relatív megnyúlás hányadosa állandó, azaz a két mennyiség egymással egyenesen arányos, hányadosuk a vizsgált anyagra jellemző állandó. A hányadost az adott anyag rugalmassági modulusának nevezzük. Jele: E , mértékegysége Pa . A rugalmassági moduluszt nyújtási modulusnak vagy Young-féle modulusnak nevezzük. (1. ábra)



1. ábra: Egy lágyacélra jellemző szakítódíagram a jellemző szakaszok bejelölésével

Forrás:

https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTMVV1/segedletek/Szakitovizsgalat_sillabusz.pdf

Ha rugalmas a nyújtás, akkor a megnyúlás egyenesen arányos az erővel és a test eredeti hosszával, fordítottan arányos a keresztmetszettel, valamint függ a test anyagától. Ezt az összefüggést a nyújtásra vonatkozó Hook-törvénynek nevezzük. A rugalmas összenyomásnál is érvényes a Hook-törvény. Összenyomás esetén a rugalmas feszültséget nyomásnak nevezzük. Rugalmas nyújtásnál, vagy összenyomásnál a testre ható erő nagyságának és a hosszúságváltozásnak a hányadosát a test rugóállandójának nevezzük. Jele: D , kiszámítása: $D = \frac{F}{\Delta l}$, mértékegysége $\frac{N}{m}$.

Az anyagvizsgálatnál a nyújtóerőt addig növelik, amíg a rúd vagy huzal elszakad és közben mérik a relatív megnyúlást. Az ilyen méréseket feszültség-relatív megnyúlás grafikonon ábrázolják. A rugalmasság határát átlépve a test maradandó alakváltozást szenved, az iparban ezt a tartományt használják az anyagok képlékeny alakításánál. Ha a testet tovább nyújtjuk, akkor keresztmetszete csökkenni kezd, és végül elszakad. (Zátonyi, 2021) [1]

Gyakorlati háttér

A gyakorlatban azért végeznek anyagvizsgálatokat, hogy minőségileg ellenőrizni tudják a termékeket. Mechanikai anyagvizsgálatokat végeznek például a gépiparban alkalmazott anyagok anyagjellemzőinek meghatározására [2].

Ilyen vizsgálatokat szakítógépekkel végzik, egy ilyen eszköz képes a próbatestet befogni és fokozatosan erővel terhelve egészen a szakadásig húzza. A szakítógépek mechanikus, hidraulikus vagy elektromechanikus működésű, különböző tartozékokkal rendelkező gépek. Terhelésük a néhány száz newtontól (N) akár a meganewton (MN) nagyságrendig is terjedhet. Vannak korszerű kivitelei is, melyek már elektromechanikus működésűek, ezek vezérlő és adatgyűjtő elektronikával, valamint anyagvizsgáló szoftverrel is rendelkeznek. Az ilyen számítógéppel vezérelt szakítógépek előnye az, hogy az adatokat részletesebben elemzik, és tárolni is tudják. Ez a minőségbiztosításnál fontos követelmény. Készülnek univerzális anyagvizsgáló berendezések is, az ilyen eszközök a szakítóvizsgálaton kívül képesek különböző tartozékok segítségével nyomó, hajlító és fásztóvizsgálat elvégzésére is. A szakítógépek fő részei a gépkeret, a hajtómű, az erő és nyúlásmérő berendezés, valamint a befogószerkezetek. (Gruber Györgyné) [2]

A méréseket az egyetemen egy egyszerű, úgynevezett törpe szakítógéppel (fonálszakító gép) (2. ábra) is elvégeztük, ami maximum 30N húzóerő kifejtésére képes, ezért csak vékony anyagok szakítóvizsgálatához alkalmas.

A vizsgálandó próbatestet két csavaros szorítóba kell rögzíteni. Az egyik egy ingás erőmérő rövidebb karjához van erősítve, a másik végzi a húzó elmozdulást. Az ingás erőmérő hosszabb karja egy skála előtt mozdul el, ez mutatja a szakítóerőt. A szakadás pillanatában az erőmutató kar megáll

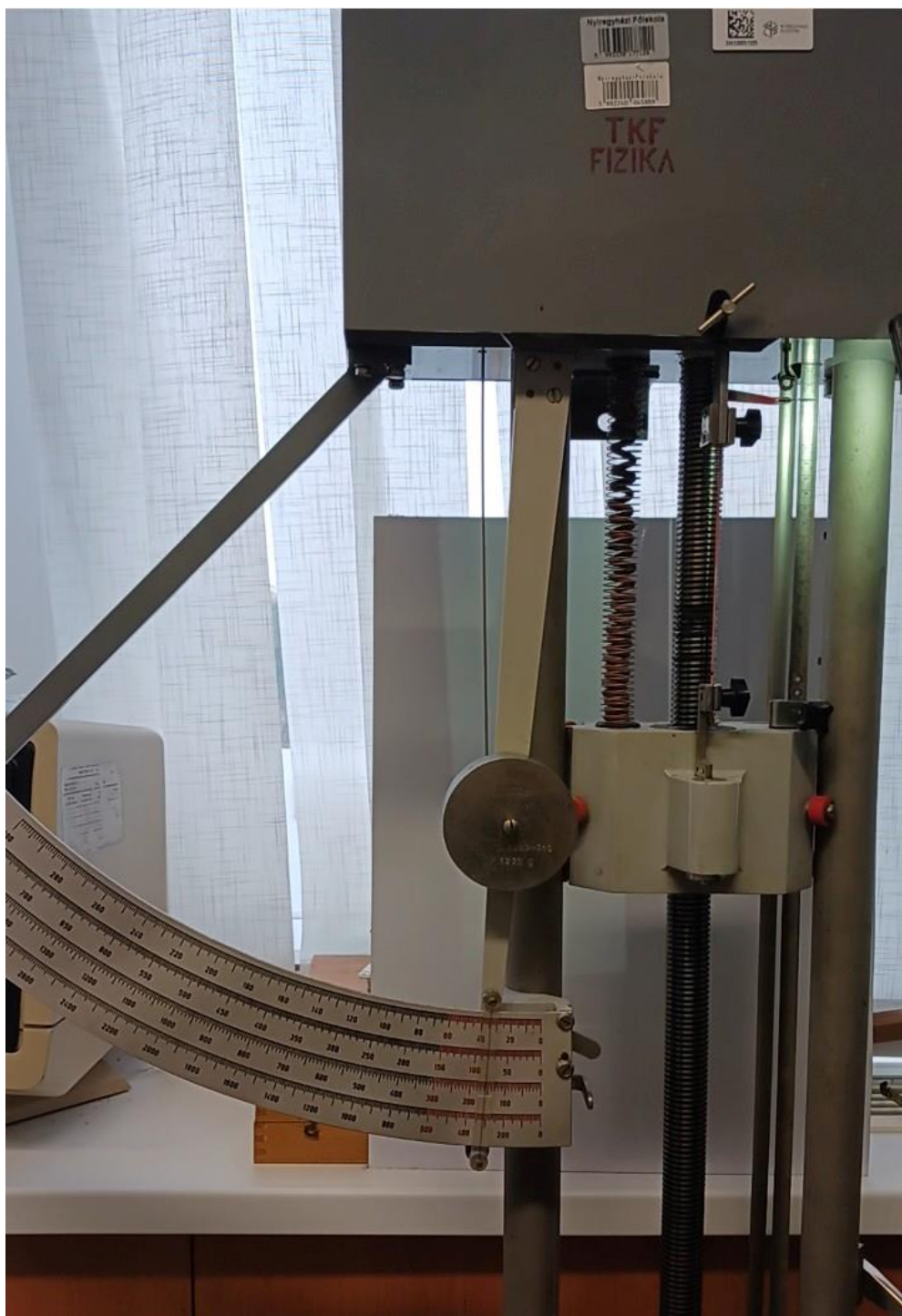
és rögzítve marad. A rögzítés oldását a skála melletti kis kar lenyomásával tehetjük meg. Az erőmérő karra különböző pótsúlyok tehetők, így 3N, 7,5N, 15N és 30N méréshatárok állíthatók be.

Szakadásig az anyag nyúlik. A szakadáskor bekövetkező megnyúlást az alsó befogófejhez erősített mérőszalagról lehet leolvasni, a felső befogóhoz erősített mutatónál. A mérőszalag a szakadás pillanatában lekapcsolódik az alsó fejről, így a szakadási nyúlás is rögzítve marad.

Elektromotor végzi az alsó befogófej mozgását. A készülék jobb oldalán található egy kar, ha ezt lefelé toljuk, akkor a fej lefelé fog elmozdulni, viszont ha felfelé toljuk, akkor a fej is felfelé mozdul. Az elektromotor bekapcsolása előtt az erőmérőkar rögzítését meg kell szüntetni a rögzítőkar lenyomásával.

Mielőtt a szakítógépbe próbatestet fogunk be, csavarmikrométerrel megmérjük az átmérőjét és a kezdeti hosszát. [3]

A nyújtás folyamatát videóra vettük és a felvételeket megmutattam a szakköre járó tanulóimnak is. Az egyetemen található eszköz az alakváltozást okozó erő nagyságát és a megnyúlást mutatja. A szakítás folyamatát visszanezve a videóból írtuk ki az összetartozó húzóerő és megnyúlás adatokat és abból tudtunk erő-megnyúlás diagramokat rajzolni. Ezt a mérést végül összehasonlítottuk a rugós erőmérővel mért értékekkel. A két módszer nem adott azonos hosszváltozást.



2. ábra: szakító gép

Forrás: saját kép

TÉMAFELVETÉS

Jelenleg fizika tanár szakos hallgató vagyok. Az egyetemi tanulmányaim során, a Mechanika órán laborméréseket végeztünk és ezekről jegyzőkönyvet kellett készíteni. A szakítógép mutatta a húzóerőt és a megnyúlást, ezeket lejegyzeteltük és táblázatba foglaltuk, majd grafikonokat készítettünk hozzá. A szakítóvizsgálat célja, hogy az anyagok húzó igénybevétellel szembeni viselkedését vizsgáljuk, és a szilárdsági és képlékenységi jellemzőit meghatározzuk.

A szakítóvizsgálat folyamán a vizsgálandó anyagból készített próbatestet állandó, kis sebességgel addig húzzuk, míg el nem szakítjuk, eközben mérjük a próbatest megnyúlását és az ehhez szükséges húzóerőt.

Az egyik alkalommal, amikor szakítógéppel végeztünk mérést, és különböző vastagságú és anyagú fémszalagok megnyúlását vizsgáltuk, akkor tanár szakosként felvetődött a kérdés, hogy fizika órán vagy iskolai szakkörön hogyan tudnánk ilyen vagy ehhez hasonló mérést elvégezni a diákokkal, mivel az iskolákban nincs lehetőségünk szakítógépet használni.

A következő ötlet jutott eszünkbe, a befőttesgumi (3. ábra) könnyen beszerezhető és nem szükséges hozzá szakítógép, hiszen egyszerűen rugós erőmérő segítségével is el tudjuk végezni a mérést. Ha mérőszalag mellett végezzük a nyújtást, akkor folyamatosan le tudjuk olvasni a megnyúlás mértékét, a rugós erőmérőről pedig a húzóerőt is. Ha még a rugós erőmérő sem áll rendelkezésünkre, akkor különböző súlyokat (akár pl. csavaranyákat) akaszthatunk a gumira, itt is mérőszalag mellett végezzük a mérést, így is figyelhetjük a megnyúlást. Célunk olyan mérés előkészítése volt, amelyet minél egyszerűbben meg tudunk valósítani iskolai körülmények között.

Mivel már jelenleg is van fizika órák és vannak érdeklődő tanulók, akik szeretnek méréseket, kísérleteket végezni, így szakköri foglalkozás keretében foglalkoztunk is a témával, tehát a diákok bevonásával végeztük el a befőttes gumi megnyúlásának a vizsgálatát.

Először szobahőmérsékleten mértünk rugós erőmérővel és a mért adatokat táblázatba foglaltuk, majd kiértékeltek. A diákok a mérés közben közvetlenül az Excel táblázatba vitték be a mérési eredményeket. Célunk az volt, hogy a diákok kivegyék a részüket minden feladatrészből, ezért a különböző méréseket úgy végezték el, hogy közben cseréltek. Aki az első mérésnél figyelte a húzóerőt, a következő mérésnél írta be az adatokat a táblázatba és fordítva.

Lehetőségem volt az egyetemi laborban szakítóképpel is elvégezni a befőttesgumi nyúlásának vizsgálatát. Össze tudtuk hasonlítani a kapott eredményeket, kiértékeltek, hogy miben más a szakítógéppel végzett mérési érték, mint a rugós erőmérővel mért érték.

Tovább vittük a gondolatot, bővítettük a mérési körülményeinket. Kíváncsiak voltunk, hogyan alakulnak a mérési adataink a hőmérséklet emelésével. Az egyik tanuló ötlete az volt, hogy egy kisebb

felfújható medencét vigyünk be az iskolába, melybe egyre melegebb vizet öntöttünk és a rugós erőmérő segítségével ismét elvégeztük a méréseket.

Célunk az volt, hogy megvizsgáljuk, hogyan viselkedik a befőttes gumi, ha a környezetét folyamatosan melegítjük. Először azt gondoltuk, hogy hajszárítóval melegítjük a gumi szálát, végül a meleg víz mellett döntöttünk. A vízfürdőben lévő befőttesgumi minden része egyformán át tud melegedni, ezért választottuk ezt a módszert. A különböző hőmérsékleten mért adatokat külön-külön táblázatba foglaltuk, illetve grafikonokon ábrázoltuk. A kapott adatokat összehasonlítva vontuk le a következtetéseket.



3. ábra befőttesgumi

Forrás: https://pepita.hu/konyhai-segedeszkozok-c1893/befottes-gumi-140db-p1844548?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAxea5BhBeEiwAh4t5KxJyzB477X0CysAXOEwRNK7uJ5mKQGVv02jIwkBIges3K3MkzRzOwBoCA8QQAuD_BwE

SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Méréseink során befőttesgumit használtunk, a relatív megnyúlás – rugalmassági feszültség értékeket ábrázoltuk.

A gumi

A gumi egy rugalmas anyag [4], amely a legtöbb anyaghoz képest már kis erővel is nagymértékben deformálható, és a deformáló erő megszűnte után ismét felveszi eredeti alakját, csak kis mértékben van maradandó alakváltozás. Képes így viselkedni sokszor ismétlődő deformációs ciklusok esetén is. A gumi alapját a kaucsuk (4.ábra) képezi, amelynek tulajdonságai nagymértékben meghatározzák a belőle készített gumi tulajdonságait.

A kaucsuk makromolekuláit úgy képzelhetjük el, mint a fonalszálakat.[4] A kaucsuk kristálytartalma kicsi. A műanyagok makromolekulái rendezettebben helyezkednek el egymás mellett, a műanyag molekulái között erősebb a kölcsönhatás.

Nyújtáskor a kaucsukmolekulát kihúzzuk a szomszéd makromolekulák közül. A kaucsuk tehát folyadék halmazállapotú, csak nagyon sűrű. Nem-newtoni folyadék, [4] ami azt jelenti, hogy folyási tulajdonságai eltérnek például a víz folyási tulajdonságaitól. Az erő megszűntekor a kihúzott makromolekula nem megy vissza a helyére, vagyis ez azt jelenti, hogy a kaucsuk első megközelítésben nem rugalmas. Ciklikus terhelés esetén az első néhány terhelési ciklus deformációgörbéje egymáshoz hasonló lefutású, értékeiben azonban eltérő lesz. Ezt a jelenséget Mullins-jelenségnek nevezzük. [4]

Vulkanizáláskor a makromolekulák között keresztkötések képződnek, így a gumi már nem folyadék, a létrejött térháló megakadályozza, hogy a test korlátlanul felvegye az őt tartalmazó edény alakját. Vulkanizáláskor keresztkötések létesülnek a láncmolekulák között. Az esetek 90%-ában kénnel vulkanizálják a nyers gumikeveréket, mert a kén a legolcsóbb vulkanizálószer. A maradék 10%-ban kén helyett használnak:

- tellúrt, szelént, kéndonorokat,
- fém-oxidokat,
- bifunkciós vegyületeket (a vegyületek sokfélék lehetnek, így sokféle a keresztkötés is, amit létesítenek a két makromolekula-szegmens között),
- peroxidokat, vagy
- nagy energiájú elektromágneses sugárzást (ilyenkor a két szénlánc közti kötés általában C-C kötés, nagyon rövid, kémiaiilag stabil kötés).

Ma már általában polimerizált ként alkalmaznak. Egy-egy esetben általában sokféle hosszúságú kénhíd képződik a két molekulalánc között. A kénhidaktól elsősorban a gumi dinamikus tulajdonságai függenek.

A kén a kaucsukmolekula kettős kötéseivel tud reakcióba lépni. Ezért nem vulkanizálhatók kénnel közvetlenül telített szénláncú molekulák. A vulkanizálás exoterm azaz hőtermelő folyamat, ezért a gumi felmelegszik.

A gumi vulkanizálásakor átlagosan minden ötvenedik szénatom vesz részt keresztkötésben. Komolyabb hőmennyiség termeléséhez ez kevés. Viszont elég nagy a kémiai reakció aktiválási energiája, és hidegen nagyon kicsi a reakciósebesség. Ezért kell melegíteni.

Ez a keresztkötés-sűrűség megfelel a rugalmas tulajdonságok kialakulásához. Ha ritkábban vannak a keresztkötések, akkor nem elég nagy a szakítószilárdság. Ha növeljük a keresztkötések sűrűségét, akkor egyre nagyobb lesz a vulkanizált gumi modulusa, egyre keményebb és merevebb lesz, míg végül ebonit [5] lesz belőle. Az ebonit rudat fizika órán az elektromosság témakörben használjuk. Szőrmével megdörzsölve az ebonit negatív töltésű lesz. Tágabb értelemben az ebonit is gumi, ezért keményguminak is hívják. Az ebonit, ellentétben a normál gumival, forgácsolással megmunkálható, lehet fűrni, esztergálni és fényesre csiszolni. Mivel nem mérgező és a savakkal szemben is ellenálló, felhasználják orvosi műszerek készítéséhez is.

A gumi deformálhatósága

A gumi erő hatására deformálódik, az erőhatás megszűnte után pedig visszanyeri eredeti alakját, és visszaadja a deformáláshoz befektetett energiát, de nem teljesen. Ha csökkentjük a deformációt, a feszültség kisebb lesz, mint ugyanakkora deformációnál a feszültség növelésekor. Ez a mechanikai hiszterézis. A deformációra fordított energia egy része elnyelődik a gumiban, és többnyire hővé alakul. Ezért mechanikai igénybevétel hatására a gumi mindig melegszik. A feszültség-deformáció grafikonon hiszterézishurok látható. Ha a gumi kevésbé rugalmas, akkor jobban melegszik. Azt is tapasztaltuk, hogy melegítés hatására csökken a gumi eredeti hossza, azaz összehúzódik, mikor a meleg vízbe beletettük.

Deformációkor a gumi kevésbé változtatja a térfogatát, gyakorlatilag összenyomhatatlannak szoktuk tekinteni. A gumi deformációja csak kis deformációnál írható le a Hooke-törvénnyel. Ha ennél nagyobb mértékben nyújtunk például állandó erővel egy gumitestet, akkor annak állandóan nő a nyúlása.

A szakítószilárdságot a részecskék közti összetartó erő határozza meg. A gumi esetében nem is olyan egyszerű megmondani, mi ez az összetartó erő. A szomszédos molekulaláncok közti gyenge kölcsönhatás keveredik a kémiai keresztkötésekkel és a kristályok szakítószilárdságával, hiszen a gumi mindig tartalmaz valamennyi kristályos gócot.

A gyakorlatban a gumi úgy szakad el, hogy egy gyenge ponton keletkezik egy repedés, és az végig terjed a teljes keresztmetszeten. Ezek a gyenge pontok lehetnek inhomogenitások (ezen belül például szilárd szemcsék, légzárványok), különböző anyagok (akár kristályos és nem kristályos részek) határfelületei, már meglevő karcolások; de felhalmozódhat a feszültség akár a gumitermék alakjából vagy a gyártástechnológiából fakadóan is. Ezt mi is tapasztaltuk a gumi keresztmetszetének mérésekor. Valóban nem voltak párhuzamosak az élei, nem volt egyforma a keresztmetszete minden mért ponton. Ha egyszer egy repedés megindul, akkor azt a kémiai kötések sem állítják meg. Ha a gumi a kémiai kötések felbomlásától szakadna el, akkor 3000 MPa lenne a szakítószilárdsága de a valóságban a 300 MPa szakítószilárdságú gumi már igen erősnek számít. A mi méréseinkben a legerősebb érték 8-9 Pa lett, ezek gyenge szakítószilárdságú gumik.

A befőttes gumin kívül rendelkezésünkre állt egy vékonyabb és egy vastagabb modellgumi is. A vékony modellguminak 1 mm volt a keresztmetszete és henger alakú volt. Bár régi, kb. 30 éves modellgumi volt, de nem rideg, jól nyújtható anyagú, a megnyúlása jóval nagyobb volt, mint a befőttesgumi megnyúlása, viszont a húzóerő hasonló mértéket mutatott.

A viszkoelasztikus viselkedés miatt a szakítószilárdság függ a deformáció sebességétől. A hosszú molekulák nem pillanatszerűen, hanem időben elhúzódva reagálnak a húzásra. Ha a makromolekulák reakciója elmarad a deformáció sebességétől, a gumi nem győz alkalmazkodni a deformációhoz, akkor nem viselkedik rugalmasan, törékeny lesz, és kisebb lesz a szakítószilárdsága. Fokozottan igaz ez a dinamikus igénybevételnél. Egy adott gumi esetében a deformáció frekvenciájának növelésével romlanak a dinamikus tulajdonságok, a gumi egyre kevesebb deformációciklust bír ki meghibásodás nélkül. Méréseink során magunk is tapasztaltuk, hogy a megnyúlás mértéke függ a megnyúlást okozó erő sebességétől.

A hőmérséklet hatása a gumira

Az alacsony hőmérsékletek hatása ugyanolyan, mint a nagy frekvenciák hatása. Mivel a hőmérséklet csökkenésével csökken a makromolekula-szegmensek mozgékonyága is, ezért a deformáció egyre nehezebben képes követni az erő hatását az adott frekvencia mellett. Bizonyos határon túl a „gumi” üvegállapotba kerül, elveszti rugalmas tulajdonságait.

A makromolekulák közti kölcsönhatás, és így a szakítószilárdság annál nagyobb, minél hosszabb a szénlánc.

A makromolekulák közti kölcsönhatás nagyobb, ha poláros csoportokat tartalmaznak. Minél több az ilyen csoport, annál nagyobb a szakítószilárdság is. A poláros csoportok kedveznek a rendezettség kialakulásának, a kristályosodásnak. Minél polárosabb a molekula, annál távolabb kerül az anyag a gumitól, annál közelebb a műanyagokhoz, és annál rövidebb láncsal elérhető ugyanaz a szakítószilárdság.

A gumigyártás során optimális tulajdonságú gumit állítanak elő. Ezután a gumi tulajdonságai általában folyamatosan romlanak. Ez a tulajdonságromlás az öregedés, mely egy irreverzibilis azaz visszafordíthatatlan folyamat. Romlanak a gumi mechanikai tulajdonságai az öregedés hatására, mert mechanikai feszültség hatására szokott elszakadni, illetve tönkre menni a gumicikk.

Az öregedést előidézhetheti magas hőmérséklet, vagy mechanikai terhelés is, különösen a többszöri (ismétlődő, ciklikus) deformáció, elektromágneses sugárzások.

Öregedés hatására a makromolekulák széttöredezhetnek, szabad gyökök keletkezhetnek, ellenőrizetlen körülmények között láncelágazások és ciklizáció következhet be. A molekulahossz csökkenése következtében a gumi elnyálkásodik, elfolyósodik. A súrlódási együttható csökken, ilyenkor a szakítószilárdság, a modulus és a szakadási nyúlás csökken, a maradó nyúlás viszont nő. A gumi tulajdonságai nagymértékben függenek a felhasznált alapanyagoktól, a különböző célokra nagyon különböző gumikat használunk, erősen eltérő összetétellel.



4. ábra Kaucsukfa

Forrás: <https://schutters.eu/kaucsukfa-vagy-gumifa/>

Rugós erőmérő

Az erő mértékegysége newton, Isaac Newtonról angol fizikus tiszteletére lett elnevezve. Az erő mérésére használjuk a rugós erőmérőt, ez egy olyan eszköz, melybe egy rugó van rögzítve és a végén van egy kampó melyre akasztani tudjuk a testet. A test súlyát meg tudjuk mérni az eszközzel. A rugó rugalmasságát használjuk fel az erő mérésére. Az általunk használt rugós erőmérő egyik oldalán a beosztás mértékegysége gramm, maximális terhelhetősége 2000 g, másik oldalán pedig newton található, 20 N maximális erőt mutat. Ahogy húztuk, nyújtottuk a befőttes gumi szálát a rugó az általunk kifejtett erőt mutatta.

Az elektromos erőmérő (5. ábra) digitális mutatja a mérési eredményt. A mértékegységeket is lehet rajta változtatni. Be lehet állítani, hogy newton (N), kilogramm (kg), font (lb) vagy uncia (oz) mértékegységet mutasson.

Az említett mértékegységek közötti átváltás a következőképpen történik, $1 \text{ kg} \approx 9,81 \text{ kg}$, számolásnál $1 \text{ kg} = 10 \text{ N}$ -nal szoktunk számolni. $1 \text{ kg} = 2,2 \text{ lb}$, valamint $1 \text{ kg} = 35,274 \text{ oz}$.



5. ábra

Forrás: https://www.denios.hu/sauter-digitalis-eromero-fk-kulonbozo-max-meresi-tartomanyokkal-30300710101160/283610?exclude_vat=0&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAi_G5BhDXARIsAN5SX7oF61jsYIivFMzeDvfaztD1muanfPz9VgTH5WGzeBr-lXNYe_2qW_caAo2DEALw_wcB

ANYAG ÉS MÓDSZEREK

A mérésekhez a háztartásokban megtalálható színes befőttesgumi gyűrűket használtunk. Az iskolában szakköri keretek között, a tanulók bevonásával végeztük el a méréseket. Tantermi körülmények között, szobahőmérsékleten kezdtük a mérést rugós erőmérő segítségével. A használt rugós erőmérő 20 N maximális húzóerőt tud mutatni, ez megfelelő volt a méréshez, mert ezen a határon belül minden mért befőttesgumi szál elszakadt.

A befőttes gumin kívül még kétféle modellgumi megnyúlását is megnéztük, de ezekkel részletesebben nem foglalkoztunk, csak az érdekesség kedvéért mértük meg ezek megnyúlását, hogy lássák a tanulók, hogy minden gumi másként viselkedik, más az összetétele, más a mérete. Látható volt, hogy a vékonyabb henger keresztmetszetű modellgumi elszakításához hasonló erő kifejtésre volt szükség, mint a befőttesgumi elszakításához, azonban sokkal nagyobb mértékű volt a hosszváltozása a modellguminak, mint a befőttesguminak. Egy másik típusú modellgumi, amely téglalap alakú volt, sokkal kisebb hosszváltozás produkált, de sokkal nagyobb húzóerő hatására szakadt el, mint az előzőek.

A befőttesgumi esetében szobahőmérsékleten több mérést is elvégeztünk, hogy ezek összehasonlításával következtetések tudjunk levonni. A gumigyűrűket elvágtuk, hogy ne kör alakúak legyen, hiszen akkor sokkal nagyobb erő hatására következik be a szakadás. Így mi befőttesgumi szálakat mértünk. A gumi két végére görcsöt kötöttünk kis hurkot képezve, vigyázva, hogy közben ne sérüljön az anyag, hogy ne befolyásolja a mérést. Ez sikerült, hiszen nem a csomó közelében történtek a szakadások. A hurokra azért volt szükség, hogy a rugós erőmérő kampós végére rá tudjuk húzni. A gumi másik végén lévő hurokba pedig egy nagyobb fém kampót akasztottunk, melynek segítségével tudtuk húzni a gumiszálakat. Mikor e nélkül szabad kézzel próbálkoztunk, akkor elég erősen meglötte a kezünket a szakadáskor, a segédeszköz beiktatásával egyszerűbb volt a mérés. (6. kép)

Az asztalon kihúztunk egy mérőszalagot, mellé helyeztük a gumi szálakat. A gumiszálak keresztmetszetét több helyen megmértük. Azt találtuk, hogy minden gumiszál 1,4 mm négyzetes keresztmetszetű volt a legvékonyabb ponton. A gumiszálak oldali nem párhuzamosak. Vannak vékonyabb és vastagabb részek, de feltételezve, hogy a legvékonyabb részen következik be a szakadás, ezzel az adattal számoltunk a továbbiakban.

A gumi egyik végén található kampót tartottuk a mérőszalag kezdőpontjánál és a másik végét pedig húztuk a rugós erőmérő segítségével. Folyamatosan figyeltük és jegyeztük le a húzóerőt és a megnyúlás nagyságát, azaz a hosszváltozást. Ezeket a mért adatokat Excel táblázatba foglaltuk, a

táblázat segítségével számoltunk relatív megnyúlást és húzó feszültséget, majd kirajzoltattuk a diagramot.

Ugyanilyen eljárással melegvízben is elvégeztük a méréseket. Egy felfújható kismedencébe először 30°C-os vizet öntöttünk és ilyen körülmények között is elvégeztük a mérést, majd vízforralóban melegítettünk vizet és adagoltuk a meglévőhöz, fokozatosan melegítve a víz hőfokát. 40°C-os, majd végül 50°C-os. Szerettük volna még 60°C-os vízben is elvégezni a mérést, de sajnos a rendelkezésünkre álló hőmérő éppen 50°C-ig tudja mutatni a hőfokot. A víz hőfokát folyamatosan hőmérő segítségével figyeltük. Az így elvégzett méréseket szintén táblázatba foglaltuk és ábrázoltuk az így kapott diagramokat is.

Végül a kapott eredményeket összehasonlítottuk és levontuk a következtetéseket. A tanulók feladata volt, hogy megállapítást tegyenek, hogyan hat a gumira, ha melegítjük.

A gumi kezdeti hosszát minden esetben megmértük a szobahőmérsékleten is mielőtt a vízbe tettük volna, hogy már az elején is látható legyen, milyen mértékben befolyásolja a melegítés a gumi hosszát.

Az egyetemen szakítógép segítségével szobahőmérsékleten végeztük el a méréseket. A gumiszálakat befogattuk a szakítógépbe. A leghosszabb szálakat kiválogatva is azt tapasztaltuk, hogy kismértékben már az indulásnál van megnyúlás és ehhez tartozó húzóerő is. Ezért ezeknek a mérések az ábrázolt diagramjai nem az origóból indulnak. Ezeket a méréseket videóra vettük és ennek segítségével tudtuk elkészíteni a táblázatokat. A szakítógépes mérésnél tapasztaltuk a folyás jelenségét, melyet a leegyszerűsített mérés alkalmával az iskolában a tanulókkal nem vettünk észre, nem volt látható ez a jelenség.



6. ábra: a méréshez használt eszközök

Forrás: saját kép

EREDMÉNYEK ÉS AZOK ÉRTÉKELÉSE

A befőttesgumi megnyúlásának vizsgálatát végeztük el szakítógéppel és rugós erőmérő segítségével. A befőttes gumik keresztmetszetének tolómérővel történő megmérésével kezdtük a feladatot, azt találtuk, hogy nem egyenletesek a gumiszálak, vannak vastagabb és vékonyabb részei, de minden guminak a legvékonyabb vastagsága 1,4 mm és nagyjából négyzet alakú keresztmetszetű, tehát a továbbiakban minden számolásnál ezt vesszük figyelembe.

Mérés szakítógéppel

A szakítógéppel történt méréseket videóra vettük és erről könnyen le tudtuk olvasni a húzóerőt és a megnyúlást. A szakítógéppel történt méréseket a diákoknak megmutattam, az így mért adatokat le tudtuk olvasni és táblázatot készítettünk. Az Excel kirajzolta a függvényeket.

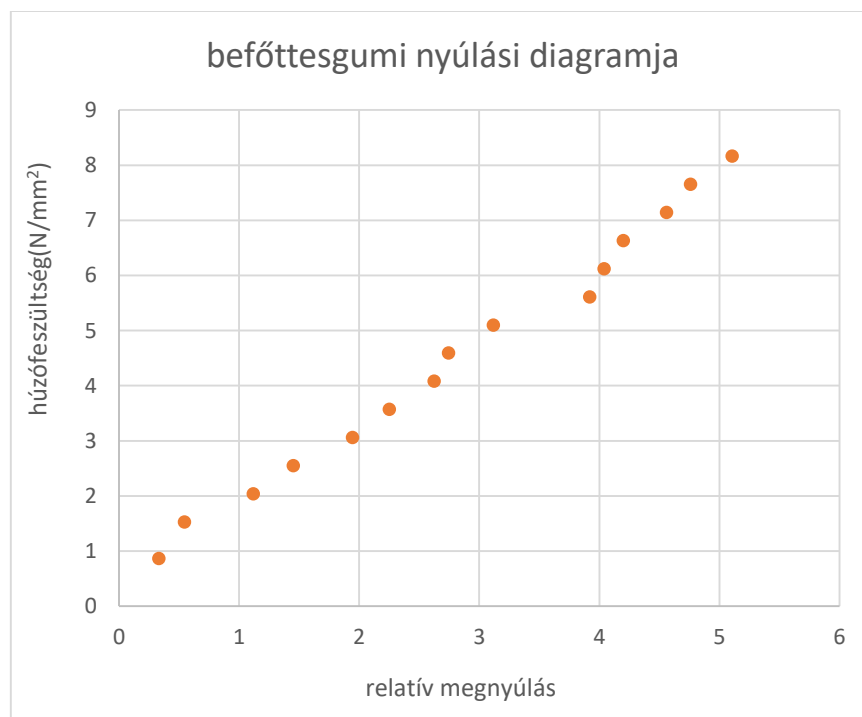
A szakítógépbe erősen kellett befogatni a gumi szálakat, mert a megnyúlás következtében elvékonyodó gumi többször kicsúszott az eszközből. Sajnos a befőttesgumik túl rövidek voltak, ezért minden alkalommal figyelembe kellett vennünk egy kezdeti megnyúlást és egy kezdeti húzóerőt is. Az alábbi táblázatból kiolvasható a megnyúlás mértéke milliméterben mérve, a húzóerő, melynek a mértékegysége newton. Kiszámoltuk a relatív megnyúlást (ε) és a rugalmas feszültséget (σ). Az összetartozó relatív megnyúlás – rugalmas feszültség párokat grafikonon (7. ábra) ábrázoltuk.

Az első mérés (1. táblázat) alkalmával a befőttesgumi kezdeti hossza $\ell_0 = 75$ mm.

1. táblázat: **Gumiszál megnyúlásának mérése szakítógép segítségével szobahőmérsékleten 1. mérés**

$\Delta \ell$ (mm)	F (N)	ε	σ (N/mm ²)
25	1,7	0,333	0,867
41	3	0,547	1,531
84	4	1,12	2,041
109	5	1,453	2,551
146	6	1,947	3,061
169	7	2,253	3,571
197	8	2,627	4,081
206	9	2,747	4,592
234	10	3,12	5,102
294	11	3,92	5,612
303	12	4,04	6,122
315	13	4,2	6,633
342	14	4,56	7,143
357	15	4,76	7,653
383	16	5,107	8,163

10,8 N húzóerőnél azt tapasztaltuk, hogy a befőttesgumi nyúlása folytatódott, viszont a húzóerő megtorpant, ez idő alatt kb. 30 mm-es megnyúlás volt leolvasható a felvételen. Ez nem meglepő jelenség, hasonló lehet tapasztalni fémek vizsgálatánál is, megmutatja, hogy mekkora feszültség hatására indul meg az anyagban a képlékeny alakváltozás. Ez a jelenség látható az ábrázolt grafikonon is, hiszen ahol a relatív megnyúlás értéke 3,12 és 3,92 közé esik ott ugrás következik be. Ez csak a szakítógépes vizsgálat esetén volt észrevehető a videó felvétel részletes kielemezésével, amikor a rugós erőmérővel végeztük a méréseket, akkor ezt nem vettük észre. Viszont a guminál tapasztalható „folyási” jelenség valószínűleg másképpen magyarázható, hiszen egészen más a szerkezete.

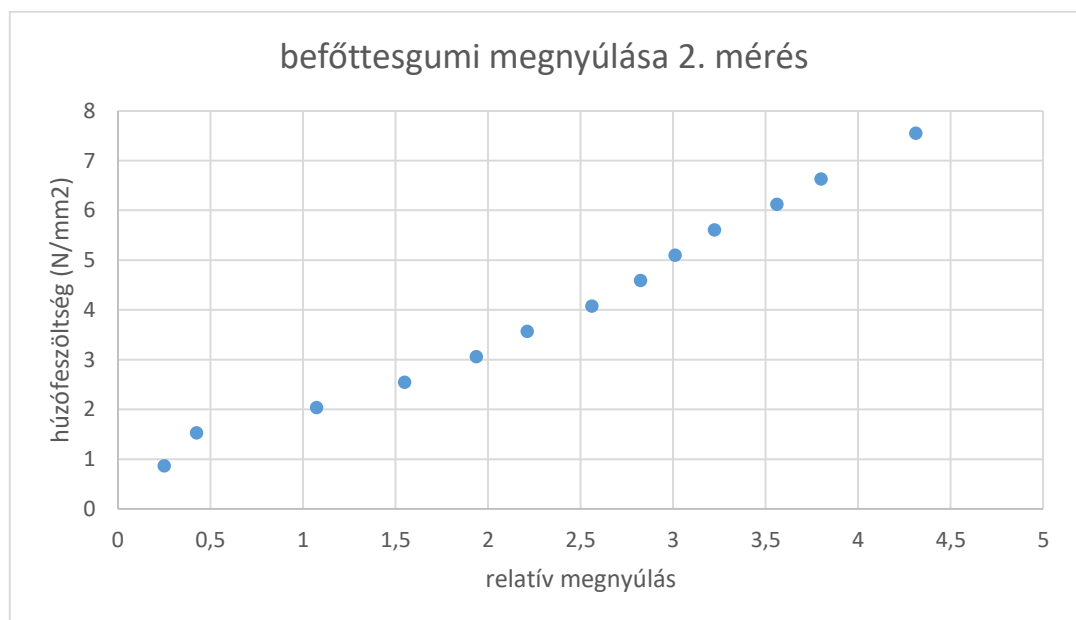


7. ábra: **Gumiszál megnyúlásának mérése szakítógép segítségével szobahőmérsékleten 1. mérés**

Az összehasonlíthatóság miatt a második mérés eredményét is szemléltetjük (2. táblázat, 8. ábra). Ebben az esetben a gumi hossza 80 mm volt alapelemben. Ehhez viszonyítva néztük a megnyúlás mértékét. A gumi keresztmetszete ebben az esetben is négyzet alakú és 1,4 mm volt a legkeskenyebb részen.

2. táblázat: **Gumiszál megnyúlásának mérése szakítógép segítségével szobahőmérsékleten**
2. mérés

Δl (mm)	F (N)	ε	σ (N/mm ²)
20	1,7	0,25	0,867
34	3	0,425	1,531
86	4	1,075	2,042
124	5	1,55	2,551
155	6	1,938	3,061
177	7	2,213	3,571
205	8	2,56	4,082
226	9	2,825	4,592
241	10	3,013	5,102
258	11	3,225	5,612
285	12	3,563	6,122
304	13	3,8	6,633
345	14,8	4,313	7,551



8. ábra: **Gumiszál megnyúlásának mérése szakítógép segítségével szobahőmérsékleten 2. mérés**

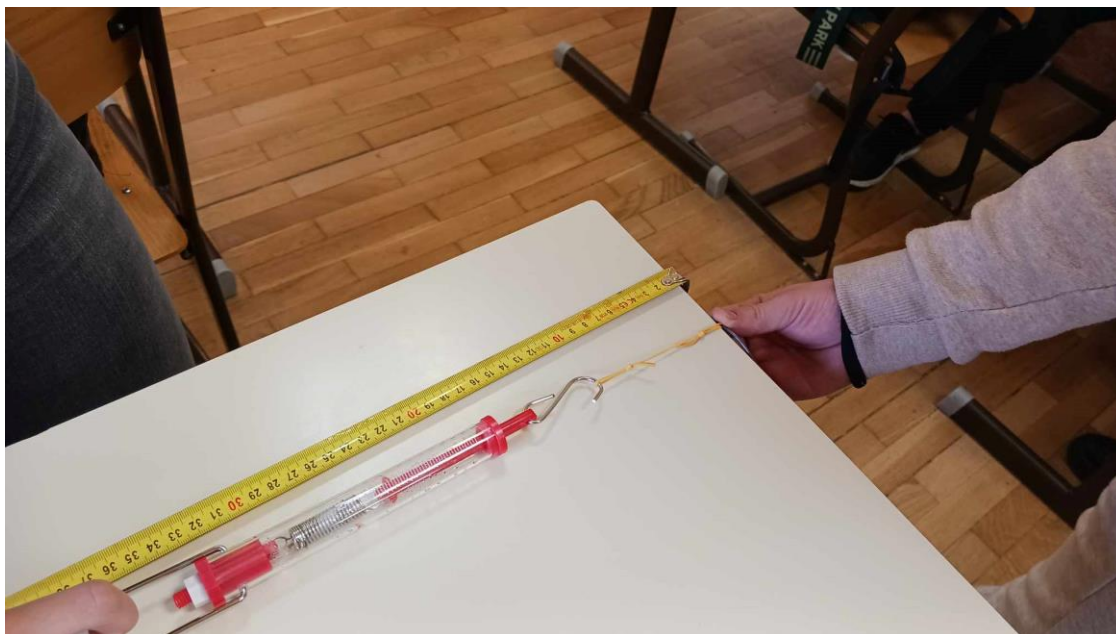
Ebben az esetben 13,8 N húzóerő esetében 1 cm hosszú megnyúlást láttunk, miközben nem változott az erő nagysága.

Összesen öt mérés elvégzése után a következőt kaptuk:

Átlagosan 14,76 N húzóerő elérése esetén szakadtak el a befőttesgumi szálak, ezek szórása 1,18N ez a jelenség átlagosan 348,6 mm megnyúlás után következett be. A megnyúlás szórása 21,5mm. A relatív megnyúlás átlagosan 4,4 volt, melynek a szórása 0,51, míg a húzófeszültségre kapott átlag $7,53 \frac{N}{mm^2}$. A húzófeszültségre számolt szórás esetén $0,6 \frac{N}{mm^2}$ -et kaptunk.

Az iskolában a tanulókkal végzett mérést rugós erőmérővel végeztük (9. ábra). A kapott adatokat itt is táblázatba foglaltuk és a diagramot is kirajzoltattuk (3. táblázat, 10. ábra, 4. táblázat, 11. ábra). Ebben az esetben a húzóerő átlagosan 15 N lett, ami 0,24 N-nal nagyobb érték, mint a szakítógéppel végzett mérések értéke, viszont itt nem tudunk olyan pontos értéket leolvasni. A gép egyenes vonalú egyenletes sebességgel tudta húzni a gumi szálát. A kézi mérés esetén nem tudtuk olyan egyenletesen húzni a mért anyagot. A megnyúlás mértéke viszont jóval a gépi mérés alatti értéket mutatta, itt mindössze átlagosan 170 mm megnyúlást tapasztaltunk. A relatív megnyúlás átlaga 3,57, míg a húzófeszültség átlagértéke $7,653 \frac{N}{mm^2}$, mely már nem mutat nagy eltérést.

A befőttesgumik keresztmetszete megegyezik a fent említett értékkel. A kezdeti hosszváltozás értékekhez itt 0 N húzóerő tartozik, ezért az origóból indulnak a diagramok. Az első táblázat esetén a kezdeti hossz 53 mm, míg a második táblázat esetén 45 mm volt. Ezekkel az értékekkel számoltunk.



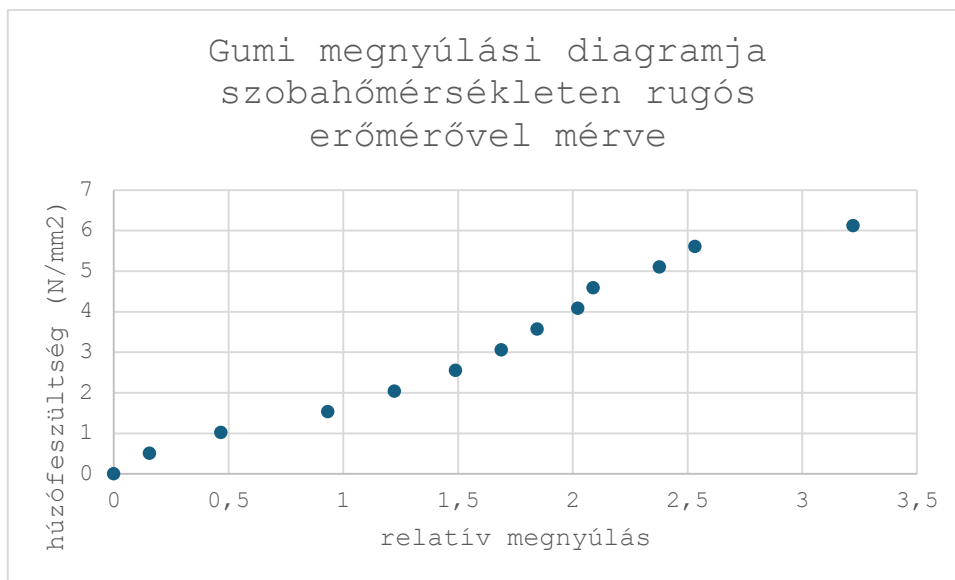
9. ábra: A diákok mérik a gumi megnyúlását rugós erőmérővel

Forrás: saját kép

3. táblázat: ábra: **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel szobahőmérsékleten**

1. mérés

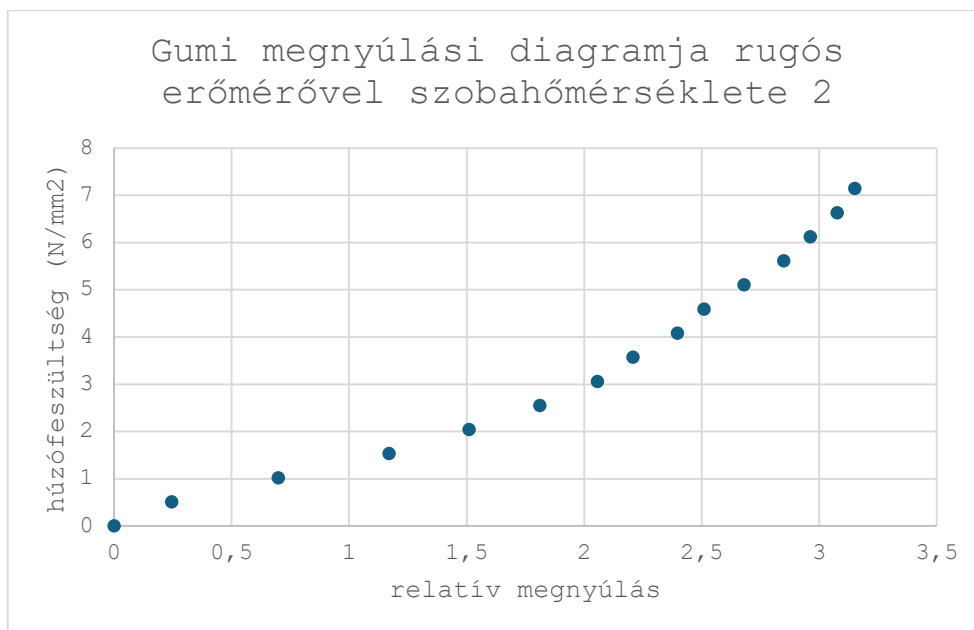
Δl (mm)	F (N)	ε	σ (N/mm ²)
0	0	0	0
7	1	0,156	0,510
21	2	0,467	1,020
42	3	0,933	1,531
55	4	1,222	2,041
67	5	1,4899	2,551
76	6	1,689	3,061
83	7	1,844	3,571
91	8	2,022	4,082
94	9	2,089	4,592
107	10	2,378	5,102
114	11	2,533	5,612
145	12	3,222	6,122



10. ábra: **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel szobahőmérsékleten 1. mérés**

4. táblázat: **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel szobahőmérsékleten 2. mérés**

Δl (mm)	F (N)	ε	σ (N/mm ²)
0	0	0	0
13	1	0,245	0,510
37	2	0,698	1,020
62	3	1,17	1,531
80	4	1,509	2,041
96	5	1,811	2,551
109	6	2,057	3,061
117	7	2,208	3,571
127	8	2,396	4,082
133	9	2,509	4,592
142	10	2,679	5,102
151	11	2,849	5,612
157	12	2,962	6,122
163	13	3,075	6,633
167	14	3,151	7,143
172	15	3,245	7,653
176	16	3,321	8,163
181	17	3,415	8,673



**10. ábra: Gumszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel szobahőmérsékleten 2.
mérés**

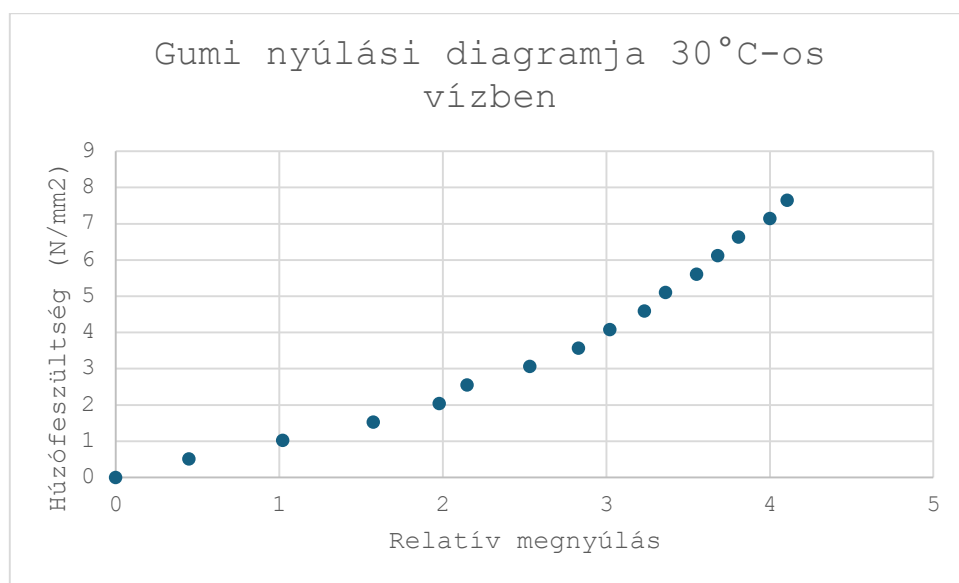
A méréseket melegvízben folytattuk. Szobahőmérsékleten mértük meg a befőttesgumikat, majd beletettük a meleg vízbe. Azt tapasztaltuk, hogy a meleg hatására a gumszál hossza csökkent, a gumi összezsugorodott. Kezdetben 30°C-os vízzel kezdünk, majd 40°C, és végül 50°C-ra melegítettük.

A 30°C-os vízben (5. táblázat, 12. ábra) a megnyúlás mértéke átlagosan 161,67 mm volt. A maximális húzóerő átlaga 12N, ami alatta van a szobahőmérsékleten kapott értékeknek. A maximális relatív megnyúlás értéke 3,465, míg a maximum húzófeszültség értéke $6,122 \frac{N}{mm^2}$, mely szintén alacsonyabb érték, mint amit a szobahőmérsékleten történt mérések alkalmával kaptunk.

5.táblázat Gumszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel 30°C-os vízben

Δl (mm)	F (N)	ε	σ (N/mm ²)
0	0	0	0
21	1	0,447	0,510
48	2	1,021	1,020
74	3	1,574	1,531
93	4	1,979	2,042
101	5	2,149	2,551
119	6	2,532	3,061
133	7	2,83	3,571

142	8	3,021	4,082
152	9	3,234	4,592
158	10	3,362	5,102
167	11	3,553	5,612
173	12	3,681	6,122
179	13	3,809	6,633
188	14	4	7,143
193	15	4,106	7,653

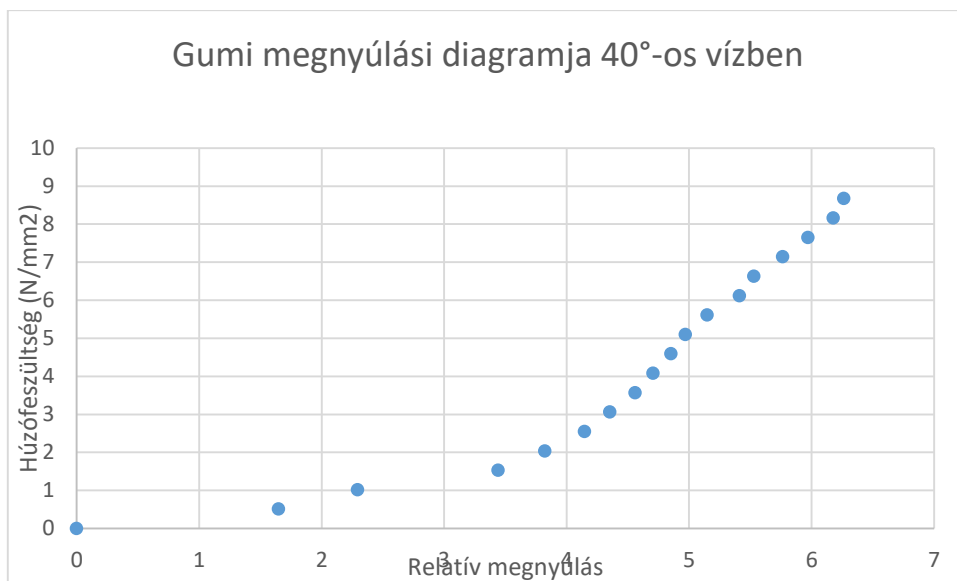


12.ábra **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel 30°C-os vízben**

A 40°C hőmérséklet (6. táblázat 13. ábra) esetén 156,67 mm-es átlagos megnyúlást mértünk, melyet átlagosan 13,67N maximális húzóerő esetén értünk el. Meglepő, hogy a megnyúlás hossza az előbbi érték alatt, míg a húzóerő fölötte van. Ezen a hőmérsékleten a relatív megnyúlásra 4,65-os értéket kaptunk, ez magasabb, mint az eddigiek. A húzófeszültségre számolt értékére pedig $6.96 \frac{N}{mm^2}$ -t kaptunk.

6.táblázat: **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel 40°C-os vízben**

Δl (mm)	F (N)	ε	σ (N/mm ²)
0	0	0	0
56	1	1,647	0,510
78	2	2,294	1,020
117	3	3,44	1,531
130	4	3,823	2,041
141	5	4,147	2,551
148	6	4,353	3,061
155	7	4,559	3,571
160	8	4,706	4,081
165	9	4,853	4,591
169	10	4,971	5,102
175	11	5,147	5,612
184	12	5,411	6,122
188	13	5,529	6,633
196	14	5,765	7,143
203	15	5,971	7,653
210	16	6,176	8,163
213	17	6,265	8,673

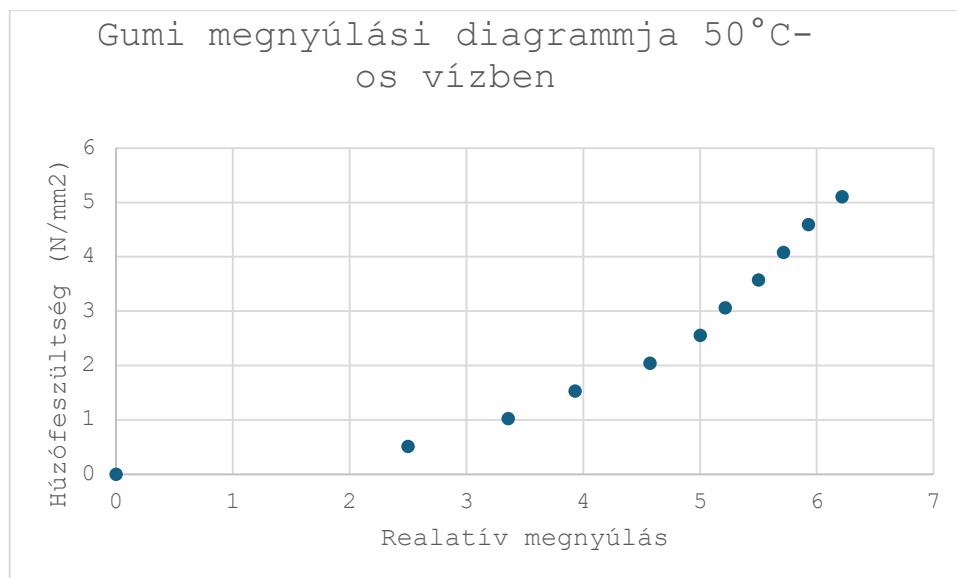


13. ábra **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel 40°C-os vízben**

Az 50°C-os vízben (7. táblázat, 14. ábra) a megnyúlás átlagos értéke tovább csökkent, mindössze 147,33 mm volt. A maximális húzóerő átlaga 12,33N, ami szinte a 30°C-on tapasztalt húzóerővel egyezik meg. Ezen a hőmérsékleten a relatív megnyúlásra 7,23-os értéket kaptunk, ami kiugróan magas az előzőkhöz képest. A húzófeszültség értékére pedig $6.29 \frac{N}{mm^2}$ -t.

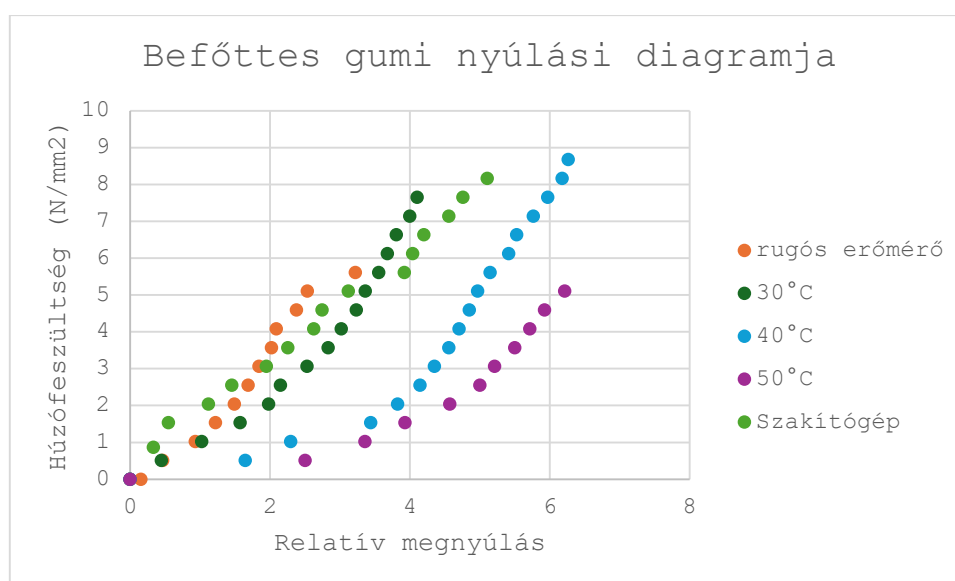
7.táblázat **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel 50°C-os vízben**

Δl (mm)	F (N)	ε	σ (N/mm ²)
0	0	0	0
35	1	2,5	0,510
47	2	3,357	1,020
55	3	3,929	1,531
64	4	4,571	2,041
70	5	5	2,551
73	6	5,214	3,061
77	7	5,5	3,571
80	8	5,714	4,081
83	9	5,929	4,592
87	10	6,214	5,102



14.ábra **Gumiszál megnyúlásának mérése rugós erőmérővel 50°C-os vízben**

Egy összefoglaló ábrát (15. ábra) is készítette, melyben együtt ábrázoltam mindegyik mérés típust:



15. ábra Befőttes gumi nyúlási összefoglaló nyújtási diagramja

A Hooke-törvény

Robert Hook angol tudós fedezte fel, ezért róla nevezték el Hooke-törvénynek a fizika egyik alapvető törvényét, amely kimondja, hogy a rugalmas anyagok deformációja egyenesen arányos a megnyúlást okozó erők nagyságával.

A Hooke-törvény csak bizonyos anyagokra és bizonyos terhelési feltételek mellett érvényes. Az acél lineáris-rugalmas anyagként viselkedik a legtöbb mérnöki alkalmazás szempontjából: a

Hooke-törvényt követi a rugalmassági tartományban vagyis a folyáshatárnál kisebb feszültségeken. Néhány más anyagnál, például alumínium esetében a Hooke-törvény a rugalmas tartomány egy részében teljesül. Ezeknél az anyagoknál rugalmassági határt állapítanak meg, mely alatt a lineáris közelítéstől való eltérés elhanyagolható.

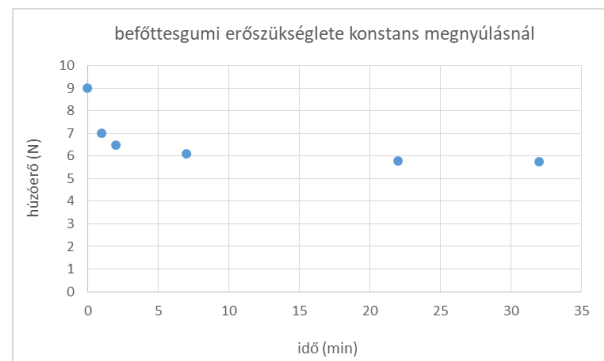
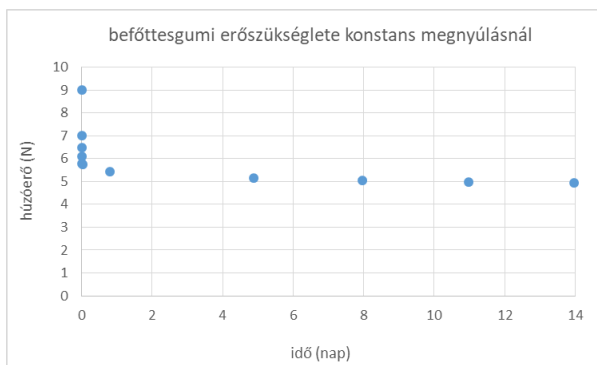
A gumit a Hooke-törvényt nem követő anyagok közé sorolják, mivel rugalmassági modulusa a terheléstől és a hőmérséklettől is függ, valamint állandó terhelés alatt is változik a megnyúlása.

Rugalmas utóhatás és hiszterézis

Ismeretes, hogy a legtöbb hétköznapi anyagnál, pl. a fémeknél kellően lassú deformáció esetén az alakváltozás azonnal követi az erő változását [6]. Ha viszont a terhelés hirtelen növekszik, az alakváltozás jól kimutatható késéssel követi. Ez a rugalmas utóhatás néven is ismert jelenség jól megfigyelhető pl. műanyag fonal vagy gumiszálak nyújtása esetén (de kellően gyors mérési elrendezéssel még a fémeknél is kimutatható).

A befőttesgumival végzett nyújtási vizsgálataink is jól ábrázolják ezt a jelenséget.

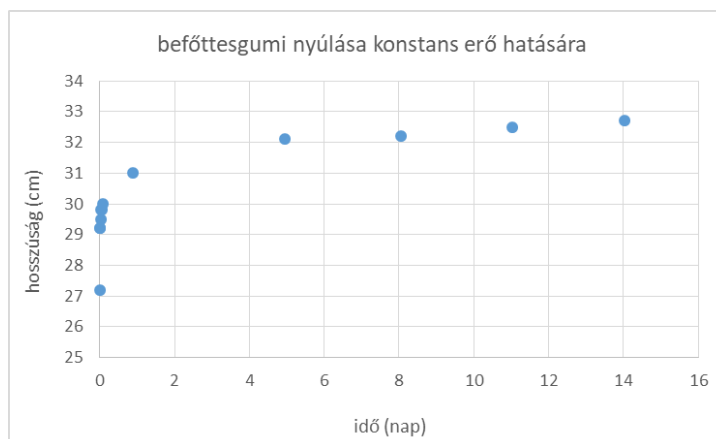
Egyik módszerként a gumiszálát rögzítettük a szakítógépben, majd – hogy biztosan ne szakadjon el – a szakadás alatti 9 N húzóerővel megterheltük, és ebben a helyzetben megállítottuk a mozgófejet. Ennél a megnyúlásnál figyeltük a húzóerő változását az idő függvényében. A kapott értékeket a 16. ábra mutatja.



16. ábra. Befőttesgumi konstans megnyúláshoz tartozó erőszükséglete az idő függvényében. A bal oldali ábra a teljes mérést mutatja, a jobb oldali pedig a kezdeti fél órát, amikor a változás még gyors volt. Látható, hogy az alakváltozás még 14 nap alatt sem fejeződött be teljesen.

Láthatjuk, hogy kezdetben, kb. az első 30-40 perc során a gumiszál belső szerkezetének változása gyorsan „követi” a terhelést, vagyis a húzóerő a kezdeti 9 N értékről lecsökken 6 N alá. Ezután az alakváltozás sokkal lassabb, viszont igen sokáig tart (még 14 nap után sem ért véget).

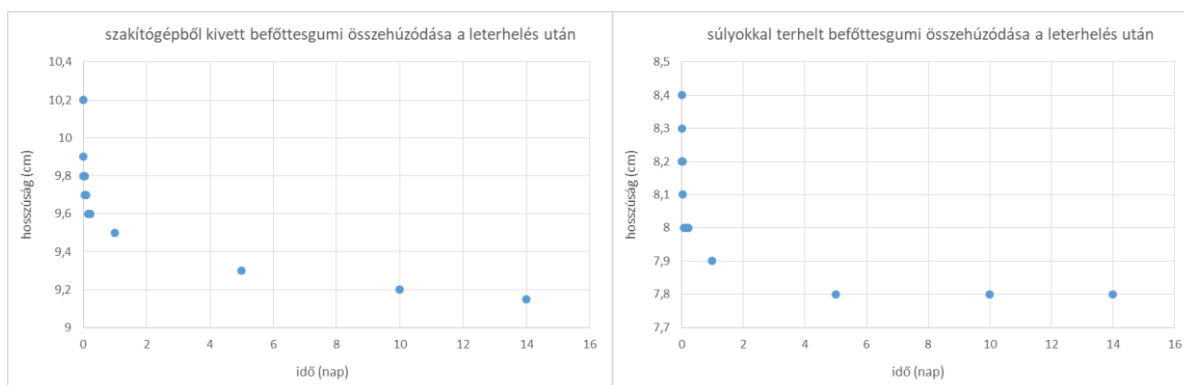
Egy másik módszerként a gumiszálát konstans erővel terheltük, és figyeltük a megnyúlását az idő függvényében. Ehhez egy 7,2 cm kezdeti hosszúságú gumiszálát az egyik végénél felfüggesztettük, majd a másik végére 200 g tömegű terhet akasztottunk, 2 N konstans húzóerőt létrehozva. Az itt kapott hosszúság értékeket a 17. ábra mutatja az idő függvényében.



17. ábra. Befőttesgumi megnyúlása 2N állandó erő hatására az idő függvényében.

Tapasztalataink szerint ebben az esetben is az előbbiekhöz hasonló viselkedést kaptunk, vagyis a gumi anyagának belső szerkezeti változása és így a hosszváltozása meglehetősen lassan és hosszú időn át követi a terhelést, még 14 nap alatt sem fejeződött be teljesen.

A gumiszálak leterhelés utáni összehúzódási viselkedését vizsgálva megállapítottuk, hogy a szakítógépből nyújtott, eredetileg 7,9 cm hosszúságú gumiszál a terhelés megszűnte után 10,2 cm hosszúságúra változott. A gumiszál várakozásainknak megfelelően lassan húzódott össze, és eredeti hosszúságát sem nyerte vissza. Hasonló viselkedést mutatott a súlyokkal terhelt gumiszál is: a kezdeti 7,2 cm-es hosszúságról a nyújtás után 8,4 cm-re nőtt, majd az összehúzódás során ugyanolyan időfüggést követett. Az összehasonlító eredményeket a 18. ábra szemlélteti.



18. ábra. Befőttesgumi összehúzódása a leterhelés után az idő függvényében a szakítógéppel illetve a súlyokkal megnyújtott gumiszálak esetén.

A szakítógéppel 9-5 N közötti húzóerőt alkalmazva a gumiszál hossza a 14 napos kísérleti periódus során a kezdeti 7,9 cm-ről 9,2 cm-re változott, ami 1,3 cm-es maradó megnyúlást eredményezett. Ezzel szemben az akasztós súlyokkal előidézett lényegesen kisebb, 2 N-os terhelés esetén a megnyúlás mértéke jóval mérsékeltebb volt: a gumiszál hossza a kezdeti 7,2 cm-ről 7,8 cm-re nőtt, amely 0,6 cm-es maradó megnyúlást jelent. Az eredmények alapján a terhelés nagysága és a maradó deformáció között szignifikáns összefüggés figyelhető meg.

Fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a gumiszál segítségével látványosan szemléltethető a mérnöki gyakorlatban jól ismert kúszás (más néven tartósfolys) [7] jelensége is, amikor a rugalmas alakváltozásra képes szilárd anyagoknál is előfordulhatnak olyan atomi-molekuláris szintű szerkezeti változások, melyek makroszkopikus szinten csak hosszú idő elteltével figyelhetők meg (pl. az acélokban is, még a folyáshatárnál kisebb feszültség esetén is).

A *hiszterézis* [6] jelensége is gyakran előfordul a gyakorlati problémákban. A befőttesgumi hiszterézis jelenségének vizsgálata során azt a folyamatot tanulmányozzuk, amikor egy anyag nem tér vissza eredeti állapotába az őt ért terhelés megszűnte után. Ugyanez a helyzet periodikus terhelés során, amikor a deformáció nincs fázisban a terheléssel. Ez különösen érdekes a gumik esetében, mivel ezek az anyagok jelentős rugalmas és viszkoelasztikus tulajdonságokat mutatnak.

Kísérletünket két gumival végeztük, melyeket közel azonos kezdeti hosszra állítottunk be. Az első esetben az adatokat azonnal leolvastuk a terhelés növelése és csökkentése során, míg a második esetben az egyes súlyok terhelése alatt öt-öt percet várakoztunk, mielőtt továbbléptünk volna. A gumikat 50 grammos súlyokkal terheltük egészen 450 grammig, majd fokozatosan visszasedtük azokat. Ezután megállapítottuk a maradandó alakváltozás mértékét. A kapott eredményeket a 19. ábra mutatja.

Az azonnali leolvasás eredményei:

A grafikon ezen esetben szorosabb "nyílást" mutat a terhelési és az azt követő visszatérési görbe között. A visszatérési szakasz során azonban még így is megfigyelhető egy maradandó alakváltozás, amely az anyag rugalmas határán túli nyúlásra utal.

5 perces terhelés utáni leolvasás:

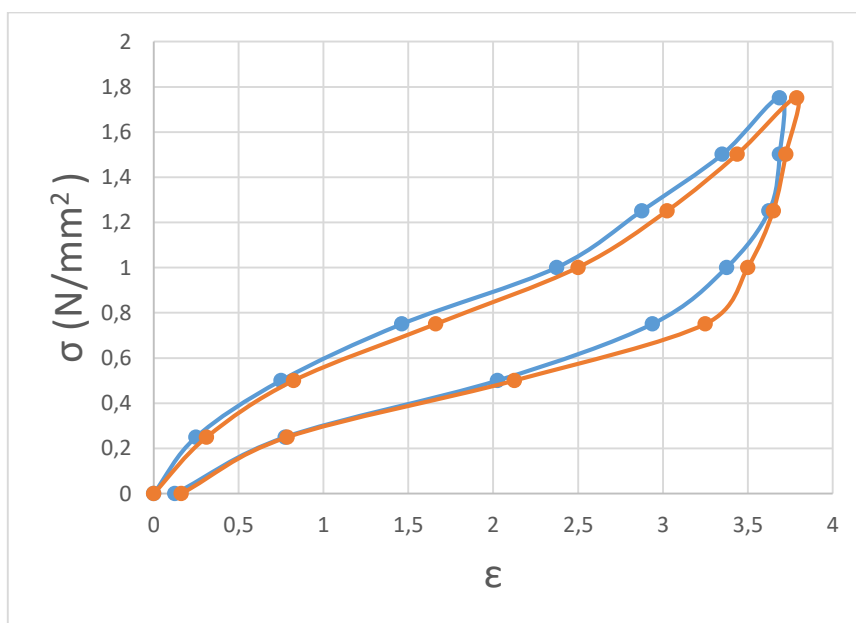
A görbe egyértelműen laposabb a terhelési szakaszban, és a visszatérési szakasz nagyobb mértékű eltérést mutat az azonnali leolvasáshoz képest. Ez a gumi időfüggő tulajdonságaira, azaz viszkoelasztikus viselkedésére utal. A várakozás hatására az anyag belső szerkezete részlegesen átrendeződött, ami nagyobb maradandó deformációhoz vezetett.

Következtetések

A gumi hiszterézise, azaz a terhelés és tehermentesítés közötti energiaelnyelés mértéke jelentősen függ a terhelés időtartamától.

Az azonnali és az 5 perces leolvasás közötti különbségek jól szemléltetik a gumi rugalmas és viszkoelasztikus komponenseinek összjátékát.

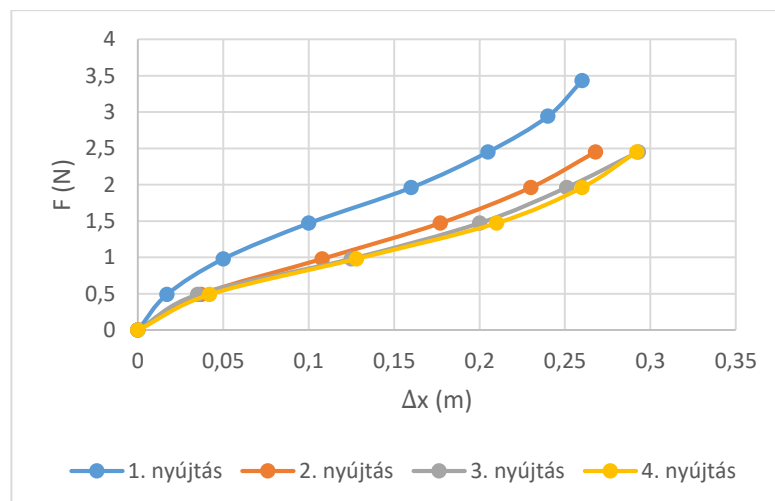
A maradandó alakváltozás nagyobb az 5 perces terhelés után, ami az időhatás szerepét hangsúlyozza a gumi szerkezeti változásaiban. Ez a vizsgálat remek lehetőség a középiskolások számára a rugalmassági tulajdonságok mélyebb megértésére, miközben a hiszterézis jelenségével, a valós életben és a mérnöki gyakorlatban is előforduló problémákkal is megismerkednek.



19. ábra. Két, azonos csomagból vett, 8 cm-es hosszal befogott befőttesgumi hiszterézise. A kék színnel jelölt gumi megnyúlásait azonnal, a narancssal jelöltét pedig 5 perc múlva olvastuk le.

A rugalmasság változása terhelés hatására

A mérés során ugyanazon a gumin többször is elvégeztük a terheléses vizsgálatot, hogy megvizsgáljuk, hogyan változik az anyag rugalmassága ismételt terhelés hatására. A mérési eredmények (ld. a 20. ábrát) azt mutatták, hogy a rugalmasság csökkenése az első néhány nyújtási ciklus során drasztikus volt, majd az ismételt nyújtásokkal egyre kevésbé változott. Ez szintén az anyag rugalmas és viszkoelasztikus tulajdonságainak kombinációjára utal.



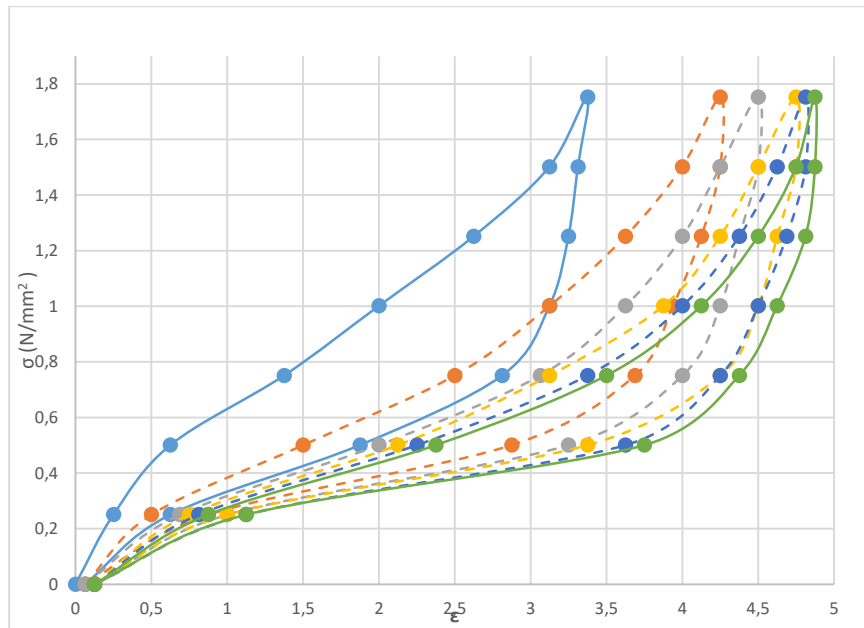
20. ábra. Egy 8 cm-es gumi egymás után mért terhelése. A mérések során maradó nyúlásokat is megfigyelhetjük.

Az első nyújtási ciklusban a gumi jelentős deformációt mutatott már viszonylag kis terhelés hatására is. Ez valószínűleg az anyagban lévő molekuláris láncok kezdeti rendeződése miatt következett be, amelyek nyújtás hatására fokozatosan átrendeződnek, csökkentve a visszatérési erő mértékét. A második és harmadik nyújtási ciklusok során a rugalmasság csökkenése mérséklődött. Ez annak tudható be, hogy az anyag már "megnyúlt" és részlegesen plasztikusan deformálódott – ahogy fentebb is láttuk a kúszás kapcsán, így kevésbé reagált az ismételt terhelésekre. A negyedik nyújtási ciklusban a deformáció már közel állandó maradt, ami arra utal, hogy az anyag elérte azt az állapotát, ahol a viszkoelasztikus viselkedés dominál, és az ismétlődő nyújtások további jelentős változást nem eredményeznek.

Az első nyújtási ciklusban jelentkező drasztikus csökkenés jól mutatja, hogy az anyag kezdetben még rendezetlen szerkezetű, ami jelentős deformációt okoz. A további csökkenés a molekuláris láncok átrendeződésével és a plasztikus deformációval magyarázható.

Az ismételt nyújtások során a gumi már kevésbé nyúlik, ami az anyag rugalmas komponenseinek csökkenésére és a viszkoelasztikus tulajdonságok dominanciájára utal.

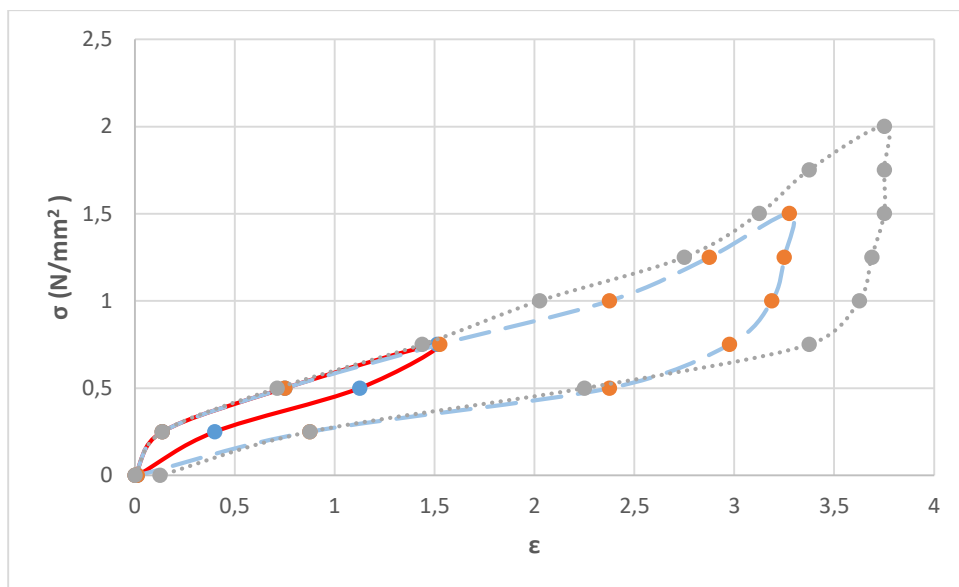
A kapott eredmények nemcsak az anyagtudomány szempontjából érdekesek, hanem praktikus jelentőséggel is bírnak, például a gumianyagok tartósságának és terhelhetőségének vizsgálatában.



21. ábra. Egy 8 cm-es kezdeti hosszúságú gumi egymás után közvetlenül mért adataiból készült hiszterézisgörbéi.

A következő mérés-sorozatban a gumiszálra fokozatosan, lépésenként helyeztünk fel 50 g-os súlyokat, egészen 350 g-ig, majd fokozatosan eltávolítottuk azokat. Ezt a folyamatot többször megismételtük, azaz a súlyokat ismételten ráraktuk és levettük. Az ismételt terhelési és tehermentesítési ciklusok eredményeképpen a 21. ábrán bemutatott hat hiszterézisgörbét kaptuk, amelyek a gumiszál viszkoelasztikus viselkedését jellemzik. A görbék fokozatosan közelítenek egymáshoz. Ez a gumiszál anyagának "fáradását" vagy a belső szerkezet rendeződését jelzi. Az első görbék meredekebbek, ami arra utal, hogy a gumiszál kezdetben nagyobb ellenállást tanúsít a deformációval szemben. A görbék közötti zárt terület mérete az energia disszipációjával arányos. A hurok területe csökkent az ismétlések során, jelezve, hogy a gumiszál kevésbé disszipált energiát, ahogy többszörösen megterheltük és tehermentesítettük.

Különböző, de ugyanabból a csomagból kivett gumiszálak egyre növekvő terhelés hatására bekövetkező deformációját is vizsgáltuk. A 22. ábrán három különböző gumiszál viselkedése látható egyre növekvő terhelés mellett, mindegyik 8 cm-es kezdeti hosszúságról indulva.



22. ábra. Különböző, de ugyanabból a csomagból kivett és azonos kezdeti hosszúságú (8 cm-es) gumiszalagok hiszterézisgörbéi egyre nagyobb terhelés hatására.

Az elemzés alapján a gumiszalagok eltérő rugalmassági és viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkeznek. A zöld pontozott görbe mutatja a legnagyobb rugalmasságot, azonban az energia disszipáció (hiszterézis) itt a legjelentősebb, ami viszkoelasztikus anyagszerkezetre utal. A piros folytonos görbe mutatja a legkisebb ellenállást és a legkisebb energia disszipációt, ami kevésbé viszkoelasztikus anyagjellemzőket sugall.

KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A szakítógépes mérés a rugós erőmérővel történ mérés összehasonlítása a szobahőmérsékleten mért adatok alapján

Fentebb már említésre került, hogy a szakítószilárdság függ a deformáció sebességétől. Ezt a tényt bizonyítja, hogy a rugós erőmérővel feleakkora megnyúlást tudtunk elérni, mint a szakítógéppel, annak ellenére, hogy a húzóerő nagysága közel azonos volt mindkét esetben. Ebből következik, hogy a relatív megnyúlás is nagyobb volt a szakítógépes mérés esetén, illetve a húzófeszültség szintén közel azonos volt.

Különböző hőmérsékleten rugós erőmérővel mért adatok összehasonlítása

Minél melegebb vízbe tettük a befőttes gumit, annál kisebb megnyúlást tudtunk elérni. Rugós erőmérővel mérve szobahőmérsékleten 170 mm, majd a 30°C-os vízben 161,67 mm, a 40°C-os vízben 156,67 mm, míg az 50°C-os vízben már csak 147,33 mm átlagos megnyúlást mértünk.

A relatív megnyúlás mértéke a legmelegebb vízben volt a legnagyobb, ami 7,23 lett. A szobahőmérsékleten számolt érték és a 30°C-os vízben számolt érték között nincs jelentős eltérés.

A húzóerő a szobahőmérsékleten volt a legnagyobb, előfordult a meleg víz esetében is, hogy sikerült 17 N erővel húzni a befőttes gumi szálát, de olyan esetet is mértünk, amikor már 10 N húzóerőnél elszakadt az anyag.

A húzófeszültség szintén a szobahőmérsékleten volt a legnagyobb, itt átlagosan $7,653 \frac{N}{mm^2}$ -t számoltunk. A 30°C és az 50°C hőmérsékletű vízben közel azonos értéket kaptunk, mely alig volt több mint $6 \frac{N}{mm^2}$.

Gyakorlati alkalmazás

A gyakorlatban a szakítószilárdság mérésre azért van szükség, hogy megtudják egy adott anyagról, hogy milyen húzóerő nagyságára szakad el. Amikor ilyen vizsgálatokat végeznek ismerniük kell a próbatest keresztmetszetét és kezdeti hosszúságát. Az ilyen vizsgálatokat szakítógépekkel végzik, amely nagy erő kifejtésére alkalmas. A mérés közben folyamatosan növelik és mérik is a próbatest megnyúlását, valamint az ehhez szükséges húzóerőt is. Ezt a két mennyiséget ábrázolva kapják a szakítódigramot. A mérés kezdetén még az anyagok rugalmasan viselkednek, a növekvő húzóerő hatására növekszik hossza, viszont ha az erőhatás, megszűnik, akkor visszaáll a kiinduló méretre, ezt hívjuk reverzibilis, azaz visszafordítható folyamatnak.

A húzóerőt tovább növelik, így rugalmassági határt átlépve az anyag megfolyik és tovább nyúlik, ez már visszafordíthatatlan, vagyis irreverzibilis folyamat. Ezt követi a keményedési folyamat, mely még nagyobb megnyúlással jár.

Amikor a legnagyobb terhelő erőt eléri, akkor a próbatest egy pontján a keresztmetszet, annyira lecsökken, hogy a próbatest elszakad. A szakító szilárdság ennek az erőnek és a keresztmetszetnek a hányadosa.

A mérés továbbfejlesztése

A mérést szeretnénk elvégezni nem csak befőttesgumival, hanem más anyagokkal. Például damillal és hajszállal is. Illetve tovább szeretnénk mérni a befőttesgumit is melegebb vízben, úgy, hogy egy csiga segítségével kivezetjük a rugós erőmérőt a forró vízből.

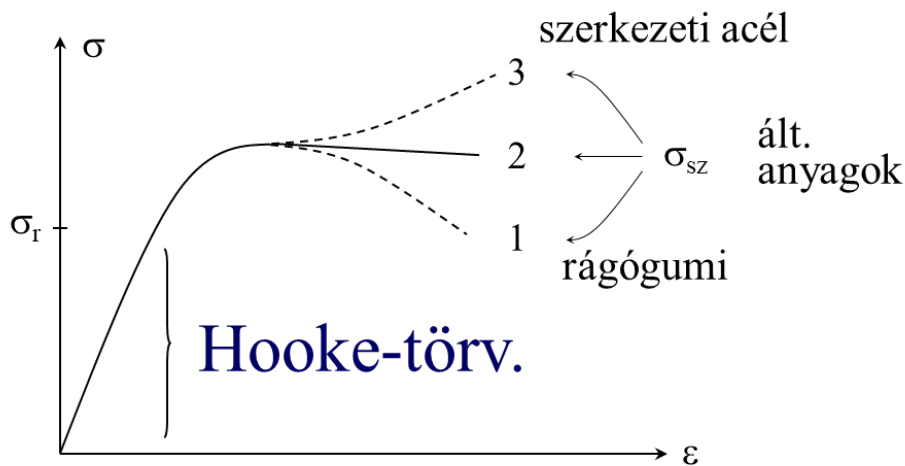
A diákok is motiváltak ez ügyben és várják a mérések folytatását. Azt tervezem, hogy a damillal való mérést fogom kiadni projekt feladat elvégzésére, melyet 2-3 fős csoportokban végeznének el a diákok.

Ezt azért tartom fontosnak, hogy a tanulók iskolai oktatásból ne hiányozzon a gyakorlat. Azt gondolom, hogy az ilyen projektekkel hozzá lehet járulni az ú.n. MTMI szakok (= Matek, Természettudomány, Műszaki, Infó) népszerűsítéséhez, azaz a STEM (=science, technology, engineering and mathematics) vagy újabban STEAM, ahol A = Arts, vagyis a művészetet is beleértik sokszor, hogy többen jelentkezzenek mérnöki vagy természettudományos és tanári pályára.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az anyagok húzóterhelésekor az anyagok megnyúlnak. Az, hogy milyen mértékben történik az a terheléstől is függ. Kis terhelés hatására az alakváltozás még rugalmas, ami azt jelenti, hogy a terhelés megszűntetése után a test visszanyeri eredeti alakját, ez a reverzibilis folyamat. Míg ha nagyobb a terhelés, akkor maradandó az alakváltozás (az ilyen folyamatot irreverzibilis azaz visszafordíthatatlan folyamatoknak nevezzük), majd ha még tovább terheljük az anyagot, akkor egy ponton a keresztmetszet teljes elvékonyodik, míg végül szakadás következik be.

Azt tudjuk, hogy a mindennapi életben használatos technikai anyagok (mint például a fémek, és elsősorban az acélok) esetében a nyújtási diagram az ábrán mutatott 2-es és 3-as görbe szerint viselkednek. Érvényes rájuk a Hooke-törvény.



Az ilyen vizsgálatokat hagyományosan szakítógéppel szokták elvégezni.

Vannak azonban olyan anyagok, melyek a mérnöki gyakorlatban nem használatosak, viszont a hétköznapi életben találkozhatunk velük, mint pl. a gumi (befőttesgumi, modellgumi, kalapgumi, stb...). Ezek viselkedése eléggé eltér a fentebb említettektől, de az iskolában, akár a fizika-, a technika- vagy a komplex természetismeret órán a diákok számára projektfeladatként kitűzhető. Törpe szakítógéppel végzett mérések mellett saját összeállítású mérőberendezést is felhasználva, rugós erőmérővel mértük a befőttesgumi nyúlását a hőmérséklet függvényében, mérőszalag mentén, hogy tudjuk követni a megnyúlás mértékét.

A kísérlet során mért hosszváltozás és a hozzájuk tartozó húzóerő értékek táblázatba foglaltuk, ezekből húzó feszültséget és relatív megnyúlást számoltunk, majd az Excellel kirajzoltattuk a diagramot.

A méréseket először szakítógéppel végeztük el, melyet videó felvétel segítségével részletesen ki tudtunk elemezni. Egy ilyen video linkje a mellékletek részben megtalálható és megtekinthető. A

méréseket rugós erőmérővel is elvégeztük, erről is készült felvétel, mely szintén megtalálható a mellékletekben.

Mindkét mérést szobahőmérsékleten végeztük el, majd a rugós erőmérővel még meleg vízben is folytattuk a kísérletet. A mérési eredményeket Excel táblázatba foglaltuk, ezekből grafikonokat ábrázoltunk és végül a kapott adatokat összehasonlítottuk.

A következő következtetéseket kaptuk:

A rugós erőmérővel feleakkora megnyúlást tudtunk elérni, mint a szakítógéppel, annak ellenére, hogy a húzóerő nagysága közel azonos volt mindkét esetben. Ebből következik, hogy a relatív megnyúlás is nagyobb volt a szakítógépes mérés esetén, illetve a húzófeszültség szintén közel azonos volt.

Minél melegebb vízbe tettük a befőtt gumi, annál kisebb megnyúlást tudtunk elérni. Rugós erőmérővel mérve szobahőmérsékleten 170 mm, majd a 30°C-os vízben 161,67 mm, a 40°C-os vízben 156,67 mm, míg az 50°C-os vízben már csak 147,33 mm átlagos megnyúlást mértünk.

A relatív megnyúlás mértéke a legmelegebb vízben volt a legnagyobb, ami 7,23 lett. A szobahőmérsékleten számolt érték és a 30°C-os vízben számolt érték között nincs jelentős eltérés.

A húzóerő a szobahőmérsékleten volt a legnagyobb, előfordult a meleg víz esetében is, hogy sikerült 17 N erővel húzni a befőtt gumi szálát, de olyan esetet is mértünk, amikor már 10 N húzóerőnél elszakadt az anyag.

A húzófeszültség szintén a szobahőmérsékleten volt a legnagyobb, itt átlagosan $7,653 \frac{N}{mm^2}$ -t számoltunk. A 30°C és az 50°C hőmérsékletű vízben közel azonos értéket kaptunk, mely alig volt több mint $6 \frac{N}{mm^2}$.

Ezzel a mérési sorozattal több témakört is tudtunk érinteni a szakkörön.

Szóba került a szakítógép által végzett nyújtás során az egyenes vonalú egyenletes sebesség, valamint az átlagsebesség fogalma is melyeket 9. osztályban már tanultak a diákok. A gumi szerkezetének megismerésekor némi anyagszerkezettel is megismerkedhettek a szakkörre járó tanulók, itt felmerült az ebonit, melyet ebben a tanévben már az elektromosság témakörnél említettünk. Valamint a víz melegítési folyamatnál hőtani fogalmakat is érintettünk.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretném megköszönni a részvevő tanulók kitartó, odaadó munkáját, hogy hozzájárultak ennek a tanulmánynak a megszületéséhez.

Szeretném megköszönni konzulenseim, Dr. Beszedá Imre főiskolai tanár és Dr. Stonawski Tamás főiskolai docens, segítő és támogató munkáját, valamint, hogy hozzájárultak az egyetemen a szakítógéppel elvégzett méréseim elvégzéséhez.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <http://www.fizikakonyv.hu/054.pdf> ifj. Zátonyi Sándor (2021)
- [2] https://www.nive.hu/Downloads/Szakkepzesi_dokumentumok/Bemeneti_kompetenciak_meresi_ertekesesi_eszkozrendszerenek_kialakitasa/5_0225_008_101215.pdf Gruber Györgyné - Roncsolásos anyagvizsgálatok 1. Szilárdsági Vizsgálatok
- [3] Beszeda Imre – Hadházy Tibor – Tarr Ferenc: Fizikai Laboratóriumi gyakorlatok I.
- [4] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Gumi>
- [5] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Ebonit>
- [6] Holics László: Fizika, Akadémiai Kiadó (2015)
- [7] Dr. Pék Lajos: Anyagszerkezetten és anyagismeret, Dinasztia Kiadó, Budapest (2000)

MELLÉKLETEK

A mérésekről készült videók elérhetőek az alábbi linken:

https://drive.google.com/file/d/1IOvLxpSi5erdE3RA6plHLYNW-li3jkBJ/view?usp=drive_link

https://drive.google.com/file/d/1GpEFiXNTrr6Xy21L-iylQakIkeaEIdd9/view?usp=drive_link