



A2

Változat: 1.36

Kiadva: 2021. február 4.

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

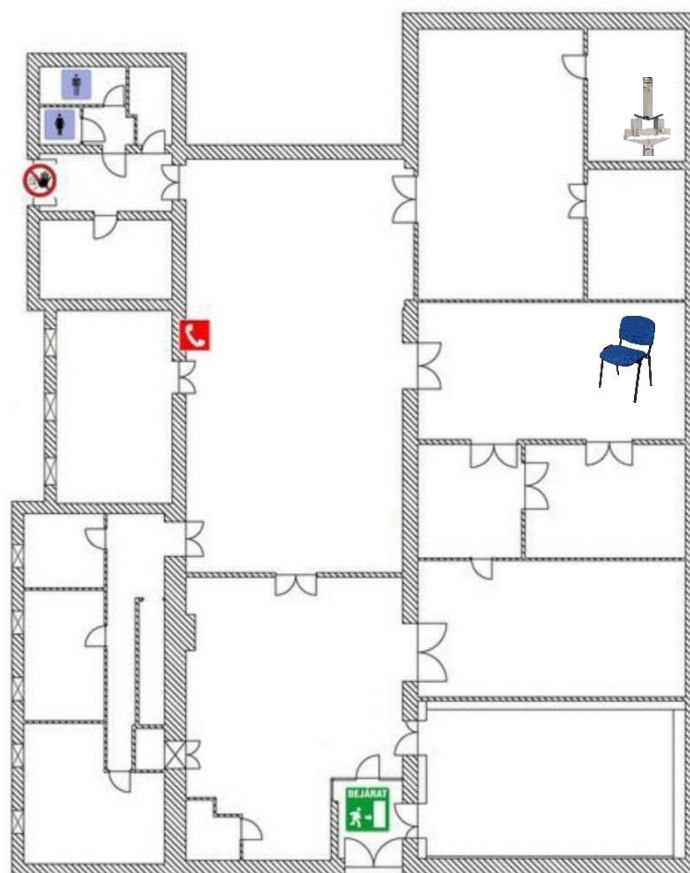
MT épület

Hajlítás

POLIMEREK HAJLÍTÓVIZSGÁLATA

**A JEGYZET ÉRVÉNYESSÉGÉT A TANSZÉKI HONLAPON KELL ELLENŐRIZNI!
WWW.PT.BME.HU**

A LABORGYAKORLAT HELYSZÍNE MT LABOR



MT
épület

TARTALOMJEGYZÉK

1. A LABORGYAKORLAT CÉLJA	3
2. ELMÉLETI HÁTTÉR	3
2.1. MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK	5
2.2. A PRÓBATEST	6
2.3. A HAJLÍTÓVIZSGÁLATBÓL MEGHATÁROZHATÓ MECHANIKAI JELLEMZŐK.....	7
3. A MÉRÉS LEÍRÁSA, ELVÉGZENDŐ FELADATOK.....	9
4. A MÉRÉS SORÁN HASZNÁLT GÉPEK, BERENDEZÉSEK	9
5. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB SZAVAK ANGOLUL, NÉMETŰL	10
6. FELHASZNÁLT IRODALOM	10
MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV	11

1. A laborgyakorlat célja

Ha egy anyag tulajdonságait meg akarjuk ismerni, a hétköznapi gyakorlatban is gyakran alkalmazzuk azt a módszert, hogy elkezdjük hajlítani. Bizonyos esetekben azt tapasztaljuk, hogy az egyik anyagot -azonos körülmények és geometria esetén- alig tudjuk deformálni, annyira merev, míg a másakra szinte csomót lehet kötni, annyira lágy. Ugyanígy tapasztalható, hogy az anyagok egy csoportja üvegszerűen rideg, törik, míg mások nagy alakváltozást is elviselnek anélkül, hogy akár csak megrepednének.

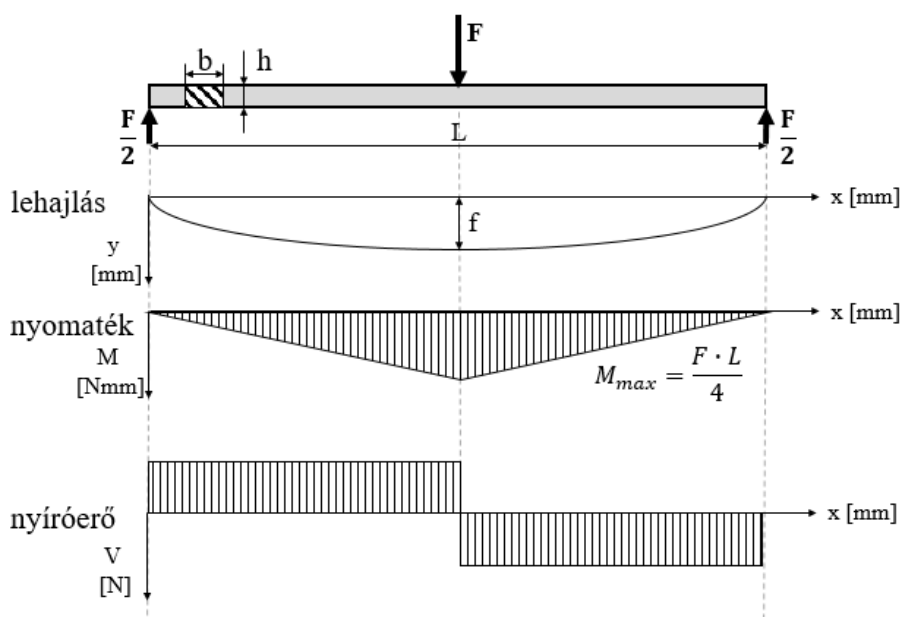
A gyakorlat célja a polimerek hajlító igénybevétellel szembeni viselkedésének a vizsgálata, a fenti jelenségek magyarázata és számszerűsítése. Célkitűzésünk, hogy a hallgatók különböző anyagú próbatestek példáján keresztül megismerjék a kvázistatikus hajlítóvizsgálat módszerét és a meghatározható mechanikai tulajdonságokat, továbbá a hajlítóvizsgálat során a polimer anyagok esetén tapasztalható speciális jelenségeket, illetve a fémek viselkedésétől történő eltéréseket.

2. Elméleti háttér

A hajlítás során a szabványban leírt geometriájú próbatestet két végénél feltámasztva, közepét meghatározott mérési körülmények (vizsgálati sebesség, hőmérséklet, nedvességtartalom) mellett nyomó igénybevétellel terheljük, eközben mérjük és regisztráljuk a deformáció (lehajlás) függvényében fellépő erőt ([videó](#)). A hárompontos hajlító vizsgálat kiértékelése során meg kell határoznunk a jellemző szilárdságot (amely a maximális teherviselő képességgel arányos) és a hajlítási rugalmassági moduluszt (amely pedig az anyag merevségét jellemzi). Az 1. ábrán található a mérés elvi elrendezése, lehajlási, nyomatéki és nyíróerő ábrája.

A polimer anyagok legfontosabb, a hajlítás során figyelembe veendő mechanikai tulajdonságai eltérőek a fémekhez viszonyítva:

- a húzó és a nyomó rugalmassági modulusok nagymértékben különbözhetnek, ami a semleges szál eltolódását okozza,
- nem lineáris a feszültség-alakváltozás kapcsolata,
- viszonylag kis terhelésre is nagy alakváltozás lép fel,
- fajlagos tömegük kicsi.



1. ábra Hárompontos hajlítás elvi elrendezése, lehajlása, nyomatéki és nyíróerő ábrája

A mechanikai jellemzők meghatározása során a húzó és nyomó modulusok különbözőségének hatását speciálisan erre az esetre levezetett összefüggésekkel lehet figyelembe venni. A hajlító karakterisztika lineáristól eltérő jellegét a modulus meghatározásánál, a törés előtti nagy alakváltozást pedig a határhajlító feszültség kiszámításával, korlátozó feltételek alkalmazásával vesszük figyelembe.

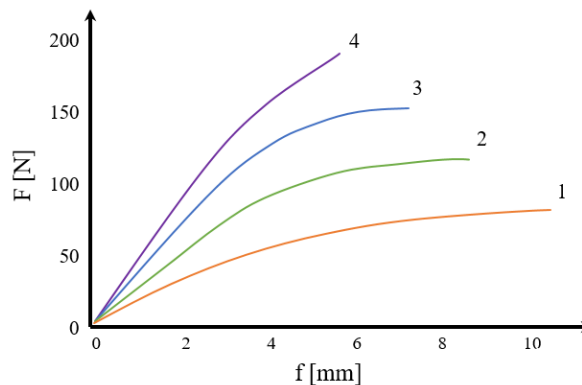
A viszkoelasztikus anyagok jellemző sajátossága, hogy általában kis rugalmassági modulusúak, azaz nagyon deformábilisak. A törés előtti nagy deformáció a feszültségek szempontjából azt jelenti, hogy hajlításnál a vizsgálati minták alakváltozása, azaz f lehajlása adott esetben már elérheti, illetőleg túlhaladhatja azt az értéket, ameddig a klasszikus számítási összefüggéseink érvényesek. Túl nagy lehajlás esetén ugyanis megszűnik a tiszta hajlítási állapot, egyre nagyobb szerepet játszanak a nyíróerők, megszűnnek függőlegesnek lenni a reakcióerők, a próbatest terhelt és terheletlen alakja egyre inkább eltér egymástól stb. Ez gyakorlatilag annyit jelent, hogy ha a lehajlás (f) meghaladja az L alátámasztási távolság 10%-át, a Navier-feltételek megszűnnek, és már nem alkalmazhatjuk a szokásos számítási képleteket. A problémát a deformáció korlátozásával lehet megoldani. A mérési diagramot csak addig a lehajlás értékig vesszük figyelembe, ameddig feltételezhetjük a klasszikus számítási összefüggések érvényességét. Ezt a lehajlás értéket **határhajlásnak nevezzük** és f^* -gal jelöljük, értéke pedig a mindenkor L alátámasztási távolság **10%-a** ($f^* = 0,1 \cdot L$). Ha tehát ezen f^* határhajlás érték elérése előtt eltörik az anyag, akkor a törési ponthoz tartozó F_t törőerőből számolt nyomatékkal a σ_{bh} **hajlítószilárdságot** határozzuk meg, és

ezzel jellemezzük a vizsgált anyag teherbírását. Abban az esetben viszont, ha az f^* határlehajlás érték eléréséig nem törik el az anyag, hanem csak f^* -nál nagyobb f értéknél törik, vagy egyáltalán nem törik el, akkor az f^* -hoz tartozó F^* határhajlító erőből számított nyomatékmal a σ_h ún. **határhajlító feszültséget** határozzuk meg, és alkalmazzuk a vizsgált anyag szilárdsági jellemzésére, összehasonlítására.

2.1. Mérési körülmények

Vizsgálati (hajlítási) sebesség: Nagyobb hajlítási sebességek esetén az anyag merevebben viselkedik, nagyobb a modulusa és általában a hajlítószilárdsága is nagyobb értékre adódik.

Vizsgálati hőmérséklet: A polimerek esetén már viszonylag kis hőmérsékletváltozás is jelentősen befolyásolja a merevséget, a szilárdságot, illetve a hajlítási karakterisztika jellegét. Az üvegesedési hőmérséklet alatt a polimerek ridegen, nagyrugalmas fizikai állapotban szívósabban viselkednek, modulusuk alacsonyabb (2. ábra).



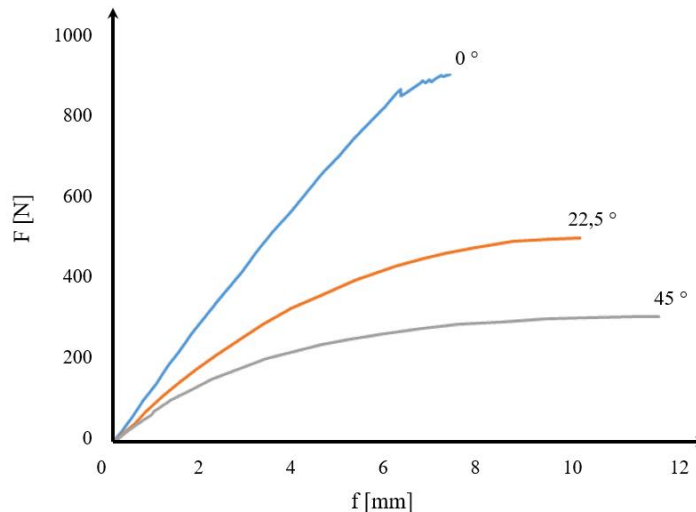
2. ábra Hajlítási hőmérséklet hatása a hajlítógörbékre két különböző típusú epoxigyanta esetében (EP-a és EP-b)
1: EP-a, 50°C 2: EP-a, 23°C 3: EP-b, 50°C 4: EP-b, 23°C

Nedvességtartalom: Vannak olyan szintetikus polimerek, amelyek képesek a tulajdonságaikat befolyásoló mennyiségű nedvesség abszorbeálására (pl. a PA, a szálerősített kompozitok). A nedvességnek lágyító hatása van, azaz csökkenti a rugalmassági moduluszt és a szilárdságot. Különösen igaz ez a különböző természetes (pl. fa), és természetes alapú (pl. keményítő alapú, stb.) polimerek, vagy a természetes szálakkal erősített kompozitok esetében.

Kompozitok hajlítása: A polimer mátrixú kompozitok jellemzői jelentős mértékben eltérnek az erősítetlen rendszerek viselkedésétől. A hajlítás során igen lényeges a próbatestekben lévő szálak orientációja. A hajlított próbatest hossztengegyével párhuzamos szálak adják a legnagyobb

merevséget, míg ettől egyre nagyobb mértékben eltérve a próbatestek modulusa egyre kisebb (3. ábra).

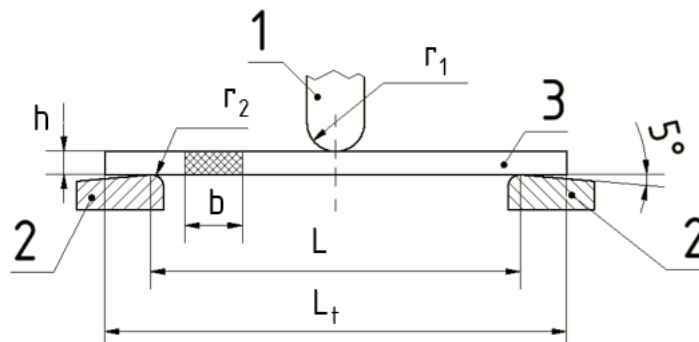
Külön kell említeni a szendvicsszerkezeteket. Ezek jellemzője a kis anyagmennyiség növekedéssel elérhető nagy hajlítómerevség növekedés ($D=IE$, ahol I a másodrendű nyomaték, E a modulus).



3. ábra A kompozit próbatestek orientációjának hatása a hajlító moduluszra.

2.2. A próbatest

A próbatest egyszerű téglalap alapú hasáb, amelynek vizsgálatát a 4. ábra szerinti elrendezésben végezzük el. A szabványos próbatestek közül a leggyakrabban használt méretek az 1. táblázatban találhatóak, az alkalmazott mérőfej és alátámasztási távolság adataival együtt.



4. ábra Hárompontos hajlítás elvi elrendezése. 1: nyomófej, 2: alátámasztás, 3: próbatest, h: a próbatest vastagsága, L: az alátámasztási távolság

1. táblázat Szabványos próbatest és alátámasztási méretek

Szabvány száma	Próbatest méretei [mm]			Alátámasztási távolság, L [mm]	Lekerekítések [mm]	
	Hossz, L_t	Szélesség, b	Vastagság, h		r_1	r_2
DIN 53452	120	15	10	100	10	1
ISO/R 178	80	10	4	64	5	2

2.3. A hajlítóvizsgálatból meghatározható mechanikai jellemzők

A hajlító vizsgálatot a szakítógépeknél szokásos módon, állandó sebességű deformáció gerjesztéssel, azaz időben egyenletesen növelt lehajlás mellett végezzük, és a lehajlás függvényében regisztráljuk az ébredő erőt.

Hajlító szilárdság meghatározása:

A σ_{bh} **hajlító szilárdság**, vagyis a töréskor elérhető maximális hajlító feszültség meghatározásához az (1) összefüggést használhatjuk:

$$\sigma_{bh} = \frac{M}{K} \quad (1)$$

ahol σ_{bh} a keresett hajlítószilárdság, M a próbatestben ébredő maximális hajlító nyomaték, K a keresztmetszeti tényező. Behelyettesítve az összefüggésbe az 1. ábra szerinti maximális nyomatékot:

$$M = \frac{F L}{2} = \frac{FL}{4} \quad \text{valamint a keresztmetszeti tényezőt: } K = \frac{bh^2}{6} \quad \text{és elvégezve az egyszerűsítéseket, a}$$

következő, az EN ISO 178:2001-es szabványban is szereplő összefüggést kapjuk (2):

$$\sigma_{bh} = \frac{3FL}{2bh^2} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

ahol F a töréshez tartozó erő [N], L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], h a próbatest vastagsága [mm].

Határhajlító feszültség meghatározása:

Amennyiben a próbatest az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő lehajlás esetén sem törik el, akkor jellemzésére a hajlító szilárdság helyett a σ_h **határhajlító feszültséget** használhatjuk. Számítása az előbbivel azonos, kivéve, hogy törőerő helyett a határlehajláshoz tartozó erőt használjuk.

Rugalmassági modulus meghatározása:

Az E_h hajlító rugalmassági modulus számításánál a semleges szál differenciálegyenletéből indulunk ki, ami az 1. ábrán látható mérési elrendezés esetén adódó peremfeltételek figyelembe vételével a mi esetünkben:

$$y'' \approx \frac{1}{R} = \frac{M}{IE} \quad (3)$$

ahol I a keresztmetszet semleges szálra számított másodrendű nyomatéka. Az egyenletet megoldva kapjuk a klasszikus „járulékképletet” erre az elrendezésre (kéttámaszú tartó közepén terhelve):

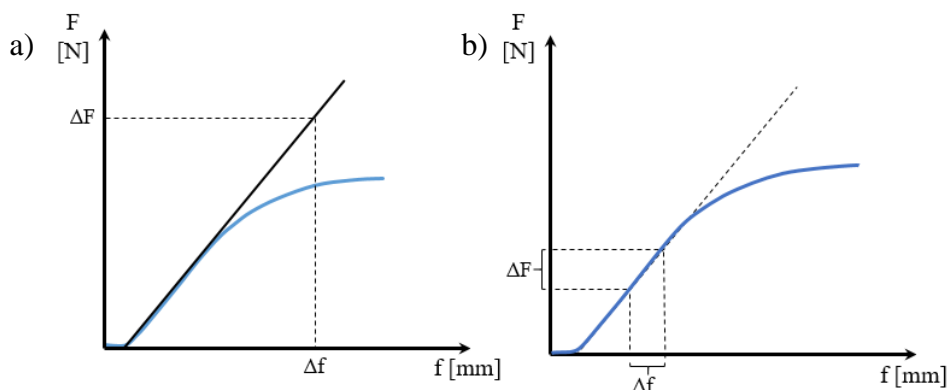
$$f = \frac{FL^3}{48IE} \quad (4)$$

ahol f a lehajlás értéke. Ennek az egyenletnek az átrendezésével és az $I = \frac{bh^3}{12}$ másodrendű nyomaték behelyettesítésével kapjuk meg a hajlító rugalmassági modulus szabványban is leírt összefüggését (5):

$$E_h = \frac{1}{4} \frac{L^3}{bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

ahol L az alátámasztási távolság [mm], b a próbatest szélessége [mm], h a próbatest vastagsága [mm], $\Delta F/\Delta f$ az erő-lehajlás görbe meredeksége. A felvett erő-lehajlás görbe azonban **nem egyenes**. Ezt a nemlinearitást Δf és ΔF meghatározásánál vesszük figyelembe.

A gyakorlaton ún. kezdeti rugalmassági modulusot határozzunk meg. Ez azt jelenti, hogy a hajlító vizsgálat során felvett erő-lehajlás diagram kezdeti lineáris szakaszához érintőt húzunk, és ennek az érintőnek a meredekségével lesz arányos a kezdeti hajlító rugalmassági modulus (érintőmodulus). Ezt a hajlítógörbén a kezdeti szakaszhoz húzott érintő tetszőleges pontjainak felhasználásával az 5/a ábra szerint határozzuk meg.



5.ábra Az érintő és húrmodulus meghatározása az erő-lehajlás diagram felhasználásával

Az így megkapott $\Delta F/\Delta f$ érték helyett szabványos mérések esetén az $\varepsilon_1=0,0005$ és $\varepsilon_2=0,0025$ nyúlásokhoz tartozó lehajlásértékeknel kell számolni, vagyis szabványos mérés esetén a modulusz a megadott értékek közötti húrmodulusz (5/b ábra).

3. A mérés leírása, elvégzendő feladatok

A mérés tárgya különböző anyagokból és módszerekkel készített próbatestek hárompontos hajlító vizsgálatának elvégzése, majd a jellemző szilárdság és a hajlító rugalmassági modulus meghatározása.

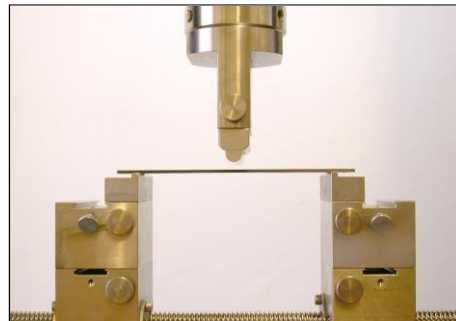
A mérés menete:

1. Hajlító vizsgálat elvégzése különböző anyagokon a 4. ábra szerinti elrendezésben.
2. A diagramon a kezdeti érintő megszerkesztése, ΔF és Δf értékek meghatározása.
3. A jegyzőkönyvben található táblázat szerinti paraméterek kiszámítása: a próbatest vastagsága (h), szélessége (b), teljes hossza (l), tömege (m), sűrűsége (ρ).
4. A törőerő, vagy a határlehajlás elérése esetén a határhajlító erő meghatározása.
5. A hajlító rugalmassági modulus (E_h) és a hajlítószilárdság (σ_{bh}), vagy a határhajlító feszültség (σ_h) kiszámítása.
6. A meghatározott anyagjellemzők és a sűrűség viszonyának meghatározása.

4. A mérés során használt gépek, berendezések

ZWICK Z005 típusú számítógép vezérlésű univerzális terhelőgép (6. ábra).

A gép méréshatára: 5 kN
Keresztfej sebesség tartománya:
0,0005 – 3000 mm/perc



6. ábra ZWICK típusú számítógép vezérlésű univerzális terhelőgépre helyezhető hajlító feltét

5. A témához kapcsolódó fontosabb szavak angolul, németül

Magyar	Angol	Német
hárompontos hajlító vizsgálat	3-point bending test	e 3-Punkt-Biegeprüfung
alátámasztási távolság	support distance	s Auflagerabstand
hajlító merevség	bending stiffness	e Biegesteifigkeit
hajlító nyomaték	bending moment	s Biegemoment
hajlító szilárdság	bending strength	e Biegefestigkeit
határhajlító erő	limit bending force	e Grenzbiegekraft
határhajlító feszültség	limit bending stress	e Grenzbiegespannung
határlehlás	limit deflection	e Grenzdurchbiegung
másodrendű nyomaték	second moment	s Trägheitsmoment
rugalmassági modulus	elastic modulus	r Elastizitätsmodul
semleges szál	neutral axis	e Neutralachse

6. Felhasznált irodalom

1. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
2. EN ISO 178:2001 szabvány: Plastics- Determination of flexural properties (2001).
3. EN ISO 527:1998 szabvány: Fibre-reinforced plastics composites- Determination of flexural properties (1998).

A segédletben szereplő, a tananyag megértését segítő videó QR-kódja:

Hajlítóvizsgálat bemutató videója



Ezt az oldalt
kinyomtatva
hozza
magával!

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

Név:

Minősítés:

Neptun kód:

Dátum:

Ellenőrizte:

Gyakorlatvezető:

1. Alapadatok

Hőmérséklet, T: [°C]
 Relatív légnedvesség: [%]
 Alátámasztási távolság [mm]

A próbatest adatai							Mért és számított eredmények				
	Anyaga	h	b	l	m	ρ	ΔF	Δf	E_h	σ_{bh} vagy σ_h	E/ρ
		[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g/cm ³]	[N]	[mm]	[MPa]	[MPa]	$\left[\frac{MPa \cdot cm^3}{g} \right]$
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											