

PE 80 vagy PE 100 legyen a csőanyag?

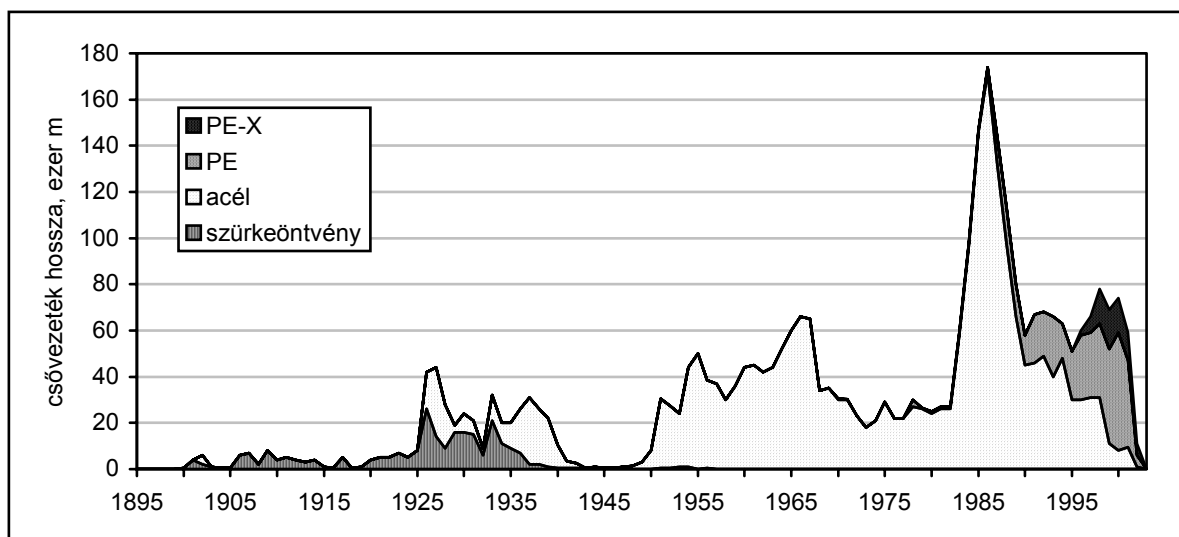
A földbe fektetett víz- és gázvezetékek fő alapanyaga ma a polietilén. A leggyakoribb PE 80 típus mellett terjed a PE 100 típusból gyártott, nagyobb nyomással üzemeltethető csövek alkalmazása is. Mindkét típusnak vannak előnyei és hátrányai. Egy német energiaellátó cég egyelőre a PE 80 mellett döntött. A Phillips cég új katalizátorrendszerével előállított PE 100 kiküszöbölheti az eddigi PE 100 csőanyagok hátrányait.

Tárgyszavak: polietilén csőanyagok; vízvezeték; gázvezeték; anyagválasztás; tulajdonságok; fejlesztés; katalizátor; új PE 100.

A németországi **EnBE** (Energie Baden-Württemberg) **Regional AG** kb. 5 millió lakosnak szolgáltat vizet, villanyt, gázt és hőenergiát. Villanyvezetékeinek hossza több mint 100 ezer km, gázvezetékei kb. 3810 km-t, vízvezetékei 1513 km-t tesznek ki. Az *I. ábra* a vállalat ellátási területén az 1900-as évek eleje óta évente lefektetett gázcsövek hosszát és alapanyagát mutatja. (A görbe egyúttal a történelmi eseményeket is tükrözi: a II. világháború 0-ra visszaeső csőfektetéseit, majd az 1970-es évek olajválságát, a több mint 10 éves stagnálást, majd az ezt követő hirtelen felfutást.) *A földbe fektetett gázcsövek alapanyaga kezdetben öntöttvas volt, 1925-ben versenytársként megjelent az acélcső, amely már a háború előtt kiszorította az öntöttvas csöveket, a háború után pedig az 1980-as évek elejéig ez a csőfajta volt az egyeduralgó a piacon. Ekkor kezdték a polietilén csöveket gázvezetékekben alkalmazni, és ma szinte csak ezeket használják erre a célra. Egy komoly versenytársuk van: az 1990-es évek vége óta hozzáférhető térhálós polietilén cső.* Ha a PE 80-as csőanyagot peroxiddal térhálósítják (PE-Xa), mechanikailag, termikusan és kémiailag nagyon ellenálló anyagot kapnak, amely tökéletesen ellenáll a feszültségrepedezésnek. Korábban PVC csöveket is fektettek földbe, de Németországban ezek időközben „kimentek a divatból.”

A polietilén csőanyagok fejlődése

Az első generációs polietilén csövek PE 63 típusú polimerből készültek. A második generációs csövekhez kevesebb komonomerrel nagyobb sűrűségű, nagyobb kristályossági fokú és szilárdságú polimereket fejlesztettek ki. A harmadik generációs csövek pedig ellenállnak a lassú és a gyors repedésterjedésnek is. Különböző polimerek keverésével vagy újfajta polimerizációs technikával bimodális vagy multimodális polietiléneket is kínálnak a csőgyártáshoz.



1. ábra Az EnBW 1900–2002 között évente lefektetett gázvezetékeinek hossza és alapanyaga

Az 1970-es években jelentek meg a hosszabb oldalláncokat tartalmazó, széles molekulatömeg-eloszlású PE-HD-k, és ezek tették lehetővé a PE 80 típusú csőanyag elterjedését. Az ebből gyártott csövek 8 MPa belső feszültséget is elviselnek legalább 50 évig. A PE 80 csőanyagok „második generációja” bimodális vagy multimodális szerkezetű, azaz molekulatömeg-eloszlási görbéjükön két vagy több csúcs jelenik meg. A poliolefingyártók legújabb kínálatában pedig szerepel a PE 100 típusú csőanyag, és az ebből extrudált csövek 20 °C-on akár 10 MPa feszültséggel is üzemeltethetők legalább 50 évig. Ennek „titka” egy különleges bimodális szerkezet. Míg a PE 80-ban a láncelágazások (oldalláncok) a rövidebb láncú molekulákon koncentrálnak, a PE 100-ban a leghosszabb láncokon is sok az elágazás. Ennek következtében több oldal-lánc „szorul ki” a kristályos fázisból, és épül be az amorf fázisba. A két fázis között sűrű kötést létesítő oldalláncok nagymértékben növelik a polimer szilárdságát.

A PE 100-nak a PE 80-nal szemben azonban nem csak előnyei vannak. A Ziegler-Natta katalizátorral előállított PE 100 csőanyagok általában sokkal kisebb az ömledékrugalmassága, mert nincsenek benne hosszú láncú elágazások, és hiányzik belőle a kis mennyiségű, de nagyon nagy molekulatömegű frakció. Emiatt a szokásos PE 100-ból nem lehet nagy átmérőjű és vastag falú csöveket gyártani, ugyanis a csövek a megdermedés előtt deformálódnak.

A másik hátrány, hogy a PE 100 előállítása körülményes és költséges. A hosszú láncokon koncentrálnak elágazásokat csak a (Ziegler-Natta) katalizátorra támaszkodva nem lehet kialakítani, ezért általában két különböző polimer keveréke adja a „bimodális” szerkezetet. A keveréket néha két külön lépésben polimerizált termék utólagos keverésével állítják elő, más esetekben a reaktor két különböző reaktív zónájában ugyanaz a katalizátor hozza létre a polimer két eltérő komponensét. A PE 80 egyetlen katalizátorral és egyetlen reaktorban szintetizálható.

A csőanyagok legfontosabb tulajdonságai

A polietilén csőanyagok egyik legjellemzőbb tulajdonsága a *sűrűség*, amely befolyásolja a rugalmasságot, a keménységet, a szívósságot, a nyúlást, a kúszást, a feszültségrepedezésre való hajlamot. *A polietilén csőanyagokkal szemben támasztott követelményeket a DVGW-Arbeitsblatt GW 335-A2 szabvány írja elő.* Ennek értelmében a földbe fektetett csövek anyagának sűrűsége $\geq 930 \text{ g/cm}^3$ kell legyen. A csőanyag tehát lehet közepes ($0,930\text{--}0,940 \text{ g/cm}^3$) sűrűségű vagy nagy ($0,940\text{--}0,965 \text{ g/cm}^3$) sűrűségű polietilén (PE-MD vagy PE-HD).

Egyre fontosabb jellemzője a csőanyagoknak a *molekulatömeg-eloszlás* (MWD, molecular weight distribution). A hagyományos, ún. monomodális polimerek „egypúpú” harang alakú görbe szerinti megoszlást mutatnak. Az új bimodális polimerek görbéje „kétpúpú”, a multimodálisé „sokpúpú”, ill. az utóbbi elszélesedő eloszlást mutat. Az utóbbiakban a rövid és hosszú oldalláncok hosszát és eloszlását tudatosan szabályozzák. Ezáltal befolyásolható a polimer szilárdsága és szívóssága.

A csövek *várható élettartamára* az ún. *MRS érték* (*minimum required strength*) utal, amely azt a tartós belső nyomást adja meg, amellyel a csövet 20 °C -on üzemeltetve várható élettartama eléri az 50 évet. *A ma használt csőanyagok PE 80 (MRS érték $8,0 \text{ MPa}$) vagy PE 100 (MRS érték $10,0 \text{ MPa}$) típusúak.*

A *rugalmassági modulus* (E-modulus) a csövek hajlékonyságát, kezelhetőségét, a *folyási szám* (*melt flow index, MFI* vagy *melt flow rate, MFR*) az ömledékviszkózitást, ezzel együtt a hegesztés könnyű vagy nehézkes kivitelezését határozza meg.

A csövek falában keletkező kis hibáknál (karc, bevágás, zárvány, repedés) helyi feszültségcsúcsok alakulnak ki, és innen *lassú repedésterjedés* indul meg, amely végül csőtöréshez vezethet. A lassú repedésterjedéssel szembeni ellenállást (nevezik *horonyérzékenységnek* is) kétféle módszerrel vizsgálják. A *DIN EN ISO 13479* vagy a hozzá hasonló *ASTM F 1474* szabvány szerinti ún. *Notch-tesztben* a csőszakaszok külső felületét négy oldalon a tengellyel párhuzamosan bemetszik (finom karcolást ejtenek rajta), majd különböző hőmérsékleten és belső nyomással tartós nyomásállósági próbának (élettartam-vizsgálatnak) vetik alá. A vizsgálat nagyon idő- és munkaigényes. Az *FNCT-tesztben* (full notch creep test) kisméretű szakítópálcákat használnak, amelyeken körkörösön hornyot képeznek, és a próbatestet feszültségkorróziót kiváltó közegben mechanikai feszültség alatt tartják. A vizsgálat nagyon érzékeny a vizsgálati körülményekre, ezért a különböző laboratóriumokban végzett vizsgálatok eredményei nehezen hasonlíthatók össze. Emiatt a *DVGW szabvány* ezt a vizsgálatot nem is tartalmazza.

Ha egy csövet erős külső mechanikai hatás ér (pl. egy munkagép által), vagy ha a belső nyomás erősen megnő, a csövön a hangsebességet megközelítő sebességgel végigfuthat egy repedés. Ezt nevezik *gyors repedésterjedésnek*, amelyet az *ISO 13477* szabványban rögzített ún. *S4 teszt* (*small scale steady state test*) jellemezik. Egy csőszakaszt, amelynek hossza a külső átmérő hétszerese, két végén lezárva 0 °C -on nitrogénnel vagy levegővel nyomás alá helyeznek, majd a cső külső felületére pengét tartalmazó súllyal ütést mérnek. Mérőszám az a kritikus nyomás, amelyen a cső megreped és a repedés az átmérő 4,7-szeresénél nagyobb távolsáig eljut.

A *karcállóság* azt jelenti, hogy a csőnek nem szabad könnyen megsérülnie a fektetéskor. Ez különösen fontos az árokmentes fektetéskor. Jellemzésére nincsen szabványos vizsgálat.

Egy csőanyag kiválasztásakor nem csak magát a csövet, hanem az egész csőrendszert kell figyelembe venni, a beépített szerelvényekkel, kötőelemekkel együtt. Ilyenkor nem csak a majdani üzemeltetés körülményeire kell gondolni, hanem a csőkötések kivitelezésére, a fektetés módjára és körülményeire is. Az 1. táblázat azt értékelteti, hogy a különböző szempontoknak valamely csőtulajdonság magasabb vagy alacsonyabb értéke jelent-e előnyt.

1. táblázat

A csőanyag kiválasztásakor előnyösnek tartott tulajdonságok
(↓ inkább alacsonyabb érték, ↑ inkább magasabb érték a kívánatos)

| Művelet | E-modulus | Folyási szám | MRS érték | SCG érték | RCP érték | Horony-szilárdság |
|----------------------------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Kötéstechnika | | | | | | |
| PE-hegesztés | ↓ | ↑ | | ↑ | | ↓ |
| Csőfektetés | | | | | | |
| Kezelés, szállítás | ↓ | | | | | ↑ |
| Árokba fektetés | ↓ | | | ↑ | | |
| Árokmentes fektetés | ↓ | | ↑ | ↑ | | ↑ |
| Üzemeltetés | | | | | | |
| Üzemi paraméterek/ élettartam | | | ↑ | ↑ | ↑ | |

PE 80 vagy PE 100?

A különböző csőanyagok tulajdonságai eltérnek egymástól, és nincs olyan típusuk, amely minden szempontból jobb lenne a többinél. Az **EnWB**-nél ezért 5 alapanyaggyártó kb. huszonötféle csőanyagáról és 7 csőgyártó csöveiről kérdőívek és személyes konzultáció útján részletes adatokat szereztek be, amelyeket saját szempontjaik szerint értékelték, hogy eldönthessék, milyen fajta polietiléncsővet alkalmazzanak a jövőben saját céljaikra. Valamennyi csőanyag kielégíti a szabványos követelményeket.

A vizsgált csőanyagokat a következőképpen csoportosították:

- I: PE 80 MD, ill. MD/HD, monomodális,
- II: PE 80 MD, ill. MD/HD, bimodális,
- III: PE 80 HD, bi- ill. multimodális,
- IV: PE 100 HD, bimodális,
- V: PE 100 HD, multimodális.

Nagy sűrűségűek (HD) a $0,940\text{--}0,965\text{ g/cm}^3$ közötti, közepes sűrűségűek (MD) a $0,930\text{--}0,940\text{ g/cm}^3$ közötti sűrűségű polietilének. Az MD/HD jelűek sűrűsége a két tartomány határán volt. Az tulajdonságokat (átlagérték, szórás) egymáshoz viszonyítva százalékosan adták meg. 100% mindenkor a legmagasabb (átlag)érték volt. Az I–V csoportok egymáshoz viszonyított tulajdonságai a 2. ábrán láthatók.

A folyási számban jelentősek a különbségek. A közepes sűrűségű PE-típusok *folyási száma* 2–4-szer nagyobb volt a nagy sűrűségűeknél, és a nagy sűrűségűek közül is a PE 80 folyóképessége volt jobb. Ez nagyobb biztonságot jelent a hegesztéskor. A PE 100 HD típusok kis folyási számuk miatt éppen csak elérték a hegeszthetőség alsó határát.

A PE 80 MD csőanyagok *E-modulusa* a PE 100 anyagokénak csak 2/3-a, ezért a belőlük készített csövek hajlékonyabbak, könnyebben fektethetők és könnyebben kezelhetők.

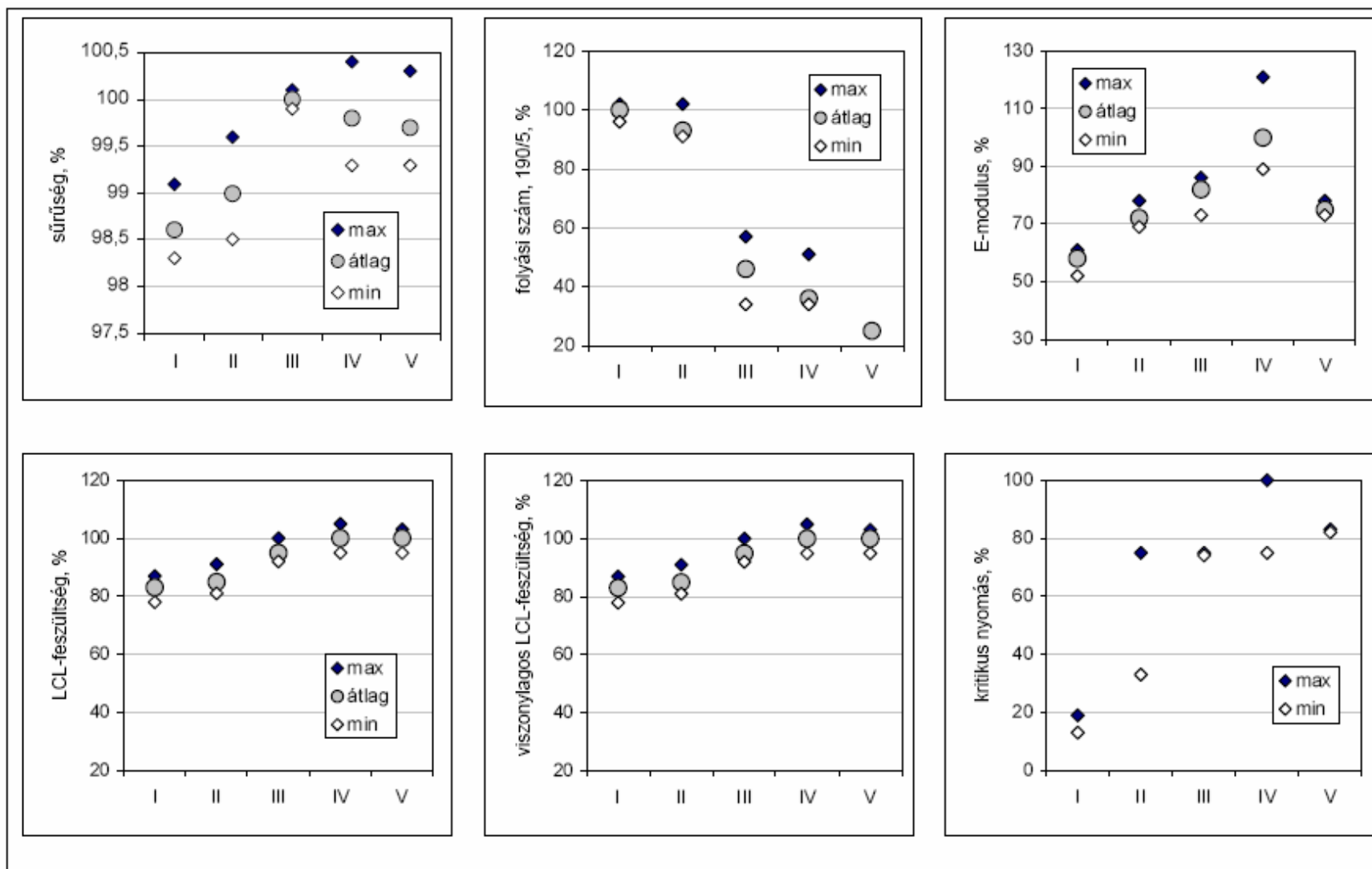
Az *LCL-feszültség* (lower confidence limit) a tartós nyomásállósági próba kísérleti eredménye, tulajdonképpen az MRS érték ellenőrzése. Nem meglepő, hogy itt a PE 100 jobb eredményeket ad, mint a PE 80. Megállapítható azonban, hogy az újabb, bimodális PE 80 típusok meghaladják a névleges, 8 MPa megengedhető nyomáshatárt és megközelítik a PE 100 értékeit.

A *lassú repedésterjedés* eredményei nem méréseken alapulnak, hanem a gyártók által szavatolt minimális értékeken. Ezért ezeket az eredményeket nem átlagolták, hanem csak a legkisebb és legnagyobb értékeket adták meg. Az eredményekből azt a következtetést vonták le, hogy a PE 80 bizonyos típusai egyenértékűek a PE 100-zal, némelyek pedig valamivel jobban is ellenállnak a repedésterjedésnek.

A *gyors repedésterjedéssel* szemben vitathatatlanok a PE 100 előnyei. A PE 80 legújabb bi- és multimodális változatai azonban megközelítik ennek a típusnak az ellenállását.

Az eredmények összesítése és összehasonlítása alapján az EnWB úgy döntött, hogy továbbra is a PE 80 csőanyagot részesíti előnyben SDR 11 típusú víz- és gázvezetékeiben. (SDR a csőátmérő és a falvastagság viszonyára jellemző szám.) A PE 80 csőanyag ugyanis tökéletesen kielégíti a követelményeket, emellett a belőle készített csövek kisebb rugalmassági modulusuk következtében könnyebben kezelhetők, fektethetők; nagyobb folyóképességük miatt könnyebben hegeszthetők (kisebb hegesztőberendezések szükségesek hozzá); az újabb PE 80 csőanyagok mind a lassú, mind pedig a gyors repedésterjedésnek sokkal jobban ellenállnak, mint a korábbi típusok. A PE 80 alkalmazásának ezenkívül gazdasági előnyei is vannak.

Nem vitatható, hogy a PE 100 csőanyag mellett is hozhatók fel érvek. A szállított gáz nyomása pl. 4 bar helyett 10 bar lehet, a víznyomás 12,5 bar helyett 16 bar; régi vezetékek felújításakor kisebb falvastagságú csövek alkalmazhatók béleléshez, pl. SDR 11 helyett SDR 17 típusúak; nagy átmérőjű (pl. 220 mm átmérőjű, 16 mm vastag falú) csövek gyártásakor és használata alatt nem kell deformálódástól tartani; árok nélkül behúzott csöveknél nagyobb húzóerőt lehet használni.



2. ábra A csőanyagcsoportok egymáshoz viszonyított tulajdonságai

A Phillips cég új PE 100 csőanyagai

A fejlesztők természetesen nagy erőfeszítéseket tesznek arra, hogy a PE 100 hátrányait kiküszöböljék. A **Chevron Phillips Chemical Company** kutatói egy *krómtartalmú katalizátort – módosított alumínium-foszfátot – próbáltak ki, és bebizonyították, hogy ezzel egyetlen reaktorban, egyetlen katalizátorral gyártható a minden szempontból kielégítő tulajdonságú PE 100.*

A **Phillips** cég zagyfázisú hurokreaktorában alkalmazott krómtartalmú katalizátorokra az a jellemző, hogy a krómvegyületet erősen pórusos hordozóra, legtöbbször szilícium-dioxidra vagy alumínium-oxidra viszik fel impregnálással, majd az így előkészített hordozót száraz levegőben vagy oxigénben kalcinálják, ezáltal a katalizátort aktiválják. Ennek az eljárásnak a következtében a króm egy része hatértékű, monodiszperz állapotban van jelen. Az alumínium-foszfát hordozónak hasonló az elektronszerkezete és a fázisszerkezete a SiO_2 hordozóéhoz, de a felülete eltérő. Hidroxilcsoportjai pl. kapcsolódhatnak foszfor- vagy alumíniumatomhoz, és savasabb jellegű, mint a SiO_2 . Szilanizált alumínium-foszfáton végzett Si^{29} NMR vizsgálatokkal a Cr többféle kötődési módját mutatták ki, aminek következtében a polimerizáció eltérő sebességgel és mechanizmussal megy végbe a különböző aktív helyeken, emiatt nagyon különböző hosszúságú és elágazottságú polimermolekulák képződnek. Egy ilyen katalizátorral kapott etilénkopolimer diszperzációs foka (M_w/M_n értéke) 30 volt, amiből legalább 8-féle aktív hely létezésére következtettek.

A **Phillips** cég kutatói egy PE 80 típusú monomodális csőanyagot, több PE 100-as bimodális csőanyagot és már kereskedelmi forgalomban levő Cr/ AlPO_4 katalizátorral előállított multimodális PE 100-as csőanyag névleges fizikai tulajdonságait hasonlították össze. Ezeket a 2. táblázat tartalmazza.

A bimodális és a multimodális csőanyagok sűrűsége és húzószilárdsága hasonló, de ezeknek a fizikai jellemzőknek a növekedése a molekulatömeg növekedésével és a molekulatömeg-eloszlás szélesedésével egyértelmű, és a PE 100-as csőanyagoké valamivel mégis magasabb a PE 80-asénál.

A 2. táblázatból látható, hogy a monomodális PE 80 csak 150 óra, a B jelű bimodális PE 100 polimer kb. 3000 óra hosszát áll ellen a lassú repedésterjedésnek annak ellenére, hogy a $>100\,000$ g/mol molekulatömegű frakcióban a rövid oldallánccok száma hasonló, ugyanakkor a molekulatömeg-eloszlási görbén látható, hogy a B polimerben ennek a nagy molekulatömegű frakciónak nagyobb a részaránya. A D jelű multimodális PE 100 polimerből készített cső viszont $>10\,000$ óra hosszát megőrzi épségét, mert egyrészt $>1\,000\,000$ g/mol molekulatömegű frakciója is van, és ezeken a hosszú molekulákon is ugyanannyi rövid oldallánc található, mint a rövidebb láncokon (3. ábra).

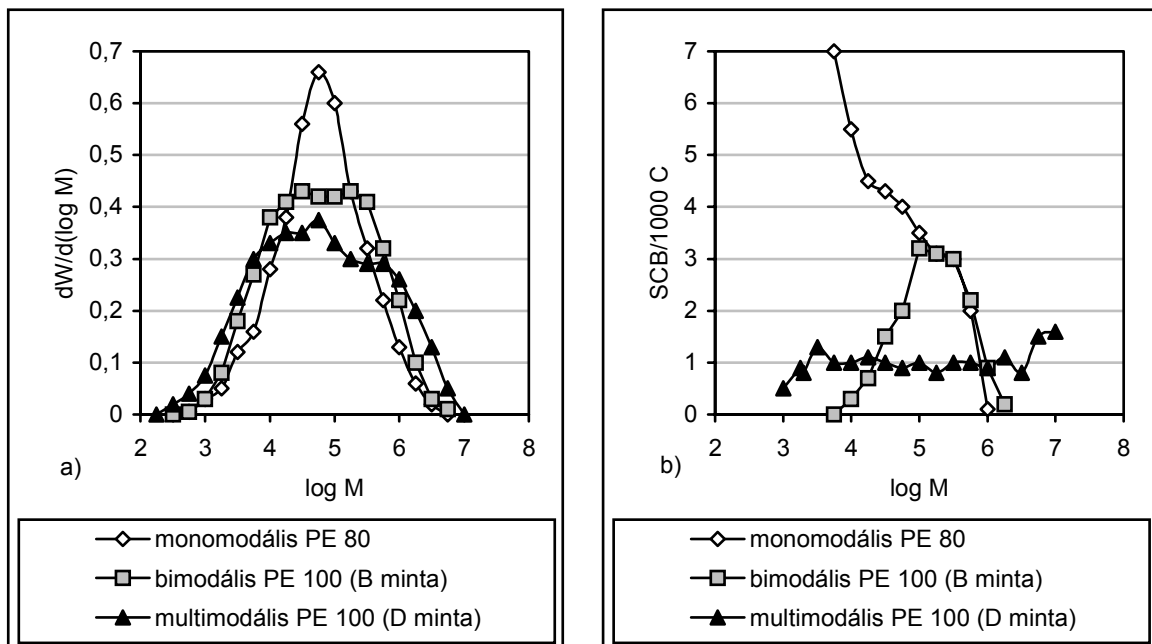
A multimodális csőanyagok Tabor koptatóberendezésen kapott *kopásállósági értékei* összevethetők a rendkívül kopásálló PE-UHMW-ével. A Charpy ütőpróbánál megadott érték a rugalmas törésből a ridegtörésbe változás hőmérsékletét jelenti. Az S4 értékek a gyors repedésterjedés kialakulásának kritikus hőmérsékletét jelentik 5 bar nyomás alatt.

2. táblázat

PE 80 és PE 100 típusú csőanyagok fizikai tulajdonságainak összehasonlítása

| Tulajdonság | Egység | PE-80 unimodális | A polimer, bimodális | B polimer ^{1/} bimodális | C polimer bimodális | C polimer multimodális | D polimer multimodális |
|--|-------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Sűrűség | g/cm ³ | 0,944 | 0,950 | 0,949 | 0,950 | 0,950 | 0,952 |
| Húzómodulus | GPa | 1,4 | 1,55 | 1,5 | 1,52 | 1,53 | 1,63 |
| Húzószilárdság | MPa | 23,2 | 25 | 25,6 | 25,3 | 25,2 | 25,9 |
| M _w | g/mol | 210 000 | 217 000 | 238 000 | 255 000 | 481 000 | 579 000 |
| M _w /M _n | – | 10,8 | 12,6 | 14,7 | 22,8 | 68,6 | 83,1 |
| Reológiai jellemzők | | | | | | | |
| Folyási szám | g/10 min | 10,0 | 7,1 | 7,0 | 17,0 | 2,3 | 2,8 |
| η ₀ | Pa.s | 1.10 ⁶ | 3,0.10 ⁵ | 2,4.10 ⁵ | 5,3.10 ⁵ | 3,0.10 ⁸ | 8,3.10 ⁷ |
| η 0,1 /s nyírósebességnél | Pa.s | 5,7.10 ⁴ | 7,8.10 ⁴ | 9,3.10 ⁴ | 9,2.10 ⁴ | 3,4.10 ⁵ | 3,8.10 ⁵ |
| η 100/s nyírósebességnél | Pa.s | 1,9.10 ³ | 2,7.10 ³ | 2,7.10 ³ | 1,9.10 ³ | 2,5.10 ³ | 2,8.10 ³ |
| Lassú repedésterjedés (ASTM F 1473) | h | 150 | ~2000 | ~3000 | ~2500 | >18 000 ^{3/} | >10 000 ^{3/} |
| Kopásállóság ^{2/} | g/1000 ford. | 0,014 | – | 0,012 | 0,012 | 0,006 | – |
| Charpy ütőpróba, törési hőmérséklet | °C | ~15 | ~35 | ~40 | ~35 | ~23 | ~30 |
| Gyors repedésterjedés (S4 próba) | | +11 | –24 | – | – | – | –8 |

^{1/}Butén komonomerrel készült; a többi csőanyag komonomerje hexén.^{2/}A Ticona cég GUR 4120 és 4150 jelű PE-UHMW-jének kopásállósága 0,006, ill. 0,0045 g/1000 fordulat.^{3/}Adatközléskor a vizsgálat még folyamatban volt.



3. ábra Háromféle polietilén csőanyag molekulatömeg-eloszlása [a] kép] és az 1000 szénatomra eső rövid oldalláncok száma a lánchosszúság (molekulatömeg) függvényében [b] kép]

A csőanyagoknak jó funkcionális tulajdonságaik mellett jól feldolgozhatónak is kell lenniük. Kis nyírósebesség mellett a PE 80-as csőanyagok és a Ziegler-Natta katalizátorral előállított bimodális PE 100-as csőanyagoknak egy nagyságrenddel kisebb a viszkozitása, mint a Cr/alumínium-foszfát katalizátorral előállított *multimodális polietiléneknek*, de az utóbbiak viszkozitása a nyírósebesség növelésével gyorsan csökken, és viszkozitásuk hasonlóvá válik a többi polimeréhez.

A multimodális csőanyagból deformálódás nélkül extrudáltak egyenes falvastagságú, 1150 mm (46 inch) átmérőjű csövet is.

Összeállította: Pál Károlyné

Delémintez, J.; Northdurft, R.; Schäfer, P. M.: Polyethylenrohre in der Gas- und Wasserversorgung: PE 100 oder doch PE 80? = GWF Gas Erdgas, 145. k. 7–8. sz. 2004. p. 386–393.

DesLauriers, P. J.; McDaniel, M. P. stb.: A comparative study of multimodal vs. bimodal polyethylene pipe resins for PE-100 applications. = Polymer Engineering and Science, 45. k. 9. sz. 2005. p. 1203–1213.

Röviden...

Miből készült a világbajnokság focilabdája?

A 2006-os németországi futball-világbajnokság „hivatalos” labdáját, a „+Teamgeist”-et az **Adidas** cég készítette. Ennek a labdának a felületét nem a szokásos 36 öt- és hatszög alakította, hanem 14 ventilátor és turbinalapát alakú elem. Rendkívüli gondot fordítottak a felső rétegre, amelyet a **Bayer MaterialScience** cég alifás poliuretánjaiból fejlesztettek ki. A legkülső réteget *Impranil ELH-A*-ból készítették; ennél a rendkívül nagy kopásállóság volt a fő szempont. A középső réteg alapanyaga *Impranil HS 85 LN*, ez volt a felelős a labda kivételes tartósságáért és rugalmasságáért. A labdát alkotó elemek a korábbi modellben használt elemeknél 15%-kal rövidebbek voltak; ennek köszönhető, hogy a +Teamgeist tökéletesen sima és tökéletes gömb alakú lett. 16 helyen mérték le a labda átmérőjét, a legkisebb és a legnagyobb átmérő közötti különbség 1%-on belül volt.

Az ideális gömbformához az is hozzájárult, hogy a 2004-es portugáliai Európa-bajnokságon használt labda 9 mm vastag belső poliuretánhab-rétegével szemben a németországi labdába 1,1 mm vastag habréteget építettek be. Ebben a habban egyenletes méretű, gázzal töltött rugalmas mikrocellák vannak, amelyek szavatolják a labda formaállóságát, energiátárolását, ami elengedhetetlen a pontos röppályához. Minél gömbölyűbb a labda, annál kiegyenlítettebben mozog a levegőben, és annál pontosabban lehet vele „lőni”. A +Teamgeist ezt maximálisan megvalósítja, bármelyik pontján is rúgják meg. Erről a fejlesztés során úgy győződtek meg, hogy egy robot a „lábával” meghatározott erővel és meghatározott szögben folyamatosan rugdalta a prototípust. *Az új labda röppályájának bizonytalansági tartománya harmadával kisebb, mint a korábbi modellé.*

A labda megőrzi kiemelkedően jó tulajdonságait akkor is, ha esik az eső vagy nedves a fű. Felülete a vizet gyakorlatilag nem ereszti át. Amikor egy vízzel töltött tartályban 250-szer megpörgették, tömege mindössze 0,1%-kal nőtt, ami két nagyságrenddel kevesebb, mint a FIFA szigorú szabványaiban megengedett 10%. A kitűnő vízállóság nem csak a felületi réteg gondosan megválasztott alapanyagainak, hanem a kötéshez alkalmazott „thermobonding” technológiának is köszönhető. Ez egy vizes poliuretánszperzió, a *Dispercol U* márkanévű ragasztón alapul, amely hő hatására aktiválódik, és rendkívül erős ragasztási szilárdságot eredményez.

Macplas International, 2. sz. 2006. jún. p. 74.

P. K.-né

