



Doktori (PhD) értekezés

Kókai Ákos Levente
Okleveles gépészmérnök

Miskolc, 2026

Kerpely Antal Anyagtudományok és -technológiák Doktori Iskola



Folyékony gyanta impregnálása téglalap keresztmetszetű kapillárisokba konstans hőmérsékleten és hőmérséklet gradiens alkalmazása mellett

Doktori (PhD) értekezés

Kókai Ákos Levente
(Okleveles gépészmérnök)

Konzulensek:
Prof. Dr. Kaptay György
MTA rendes tagja

Dr. Baumli Péter

A doktori iskola elnöke:
Prof. Dr. Mertinger Valéria
MTA doktora

Miskolc, 2026

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	8
2. Irodalmi áttekintés.....	9
2.1. Elektromotorok felépítése és impregnálási technológiái.....	9
2.1.1. Elektromobilizáció és elektromotorok fejlesztési tendenciái.....	9
2.1.2. Villamos motorok szigetelő rendszerének felépítése.....	10
2.1.3. Hajtú tekercseléssel készített elektromos motor gyártási folyamata.....	11
2.1.4. A tekercselés impregnálása.....	13
2.1.5. Különféle impregnálási eljárások és a csepegtetési impregnálás.....	13
2.2. Határfelületi kapilláris erő és kapillárisba történő gyanta penetráció.....	14
2.3. PEEK rézvezető szigetelő bevonatának UV kezelése.....	18
2.4. Hőmérséklet-gradiens hatásának vizsgálata.....	20
3. A kutatás célja.....	22
4. Elméleti munka.....	24
4.1. Rézvezetők közé penetráló gyanta sebességének elméleti modellje.....	24
4.1.1. Alapvetések.....	24
4.1.2. A határfelületi kapilláris erő.....	25
4.1.3. A gravitációs erő.....	27
4.1.4. A súrlódási erő.....	28
4.1.5. A keresett egyenletek levezetése.....	29
4.2. A penetrációs idő elméleti modellje hőmérséklet-gradiens esetén.....	30
4.3. Izoterm és hőmérséklet-gradiens melletti penetráció összehasonlítása.....	33
4.3.1. A kritikus penetrációs úthossz meghatározása.....	34
4.3.2. Modell paraméterek és a kritikus hőmérséklet-gradiens meghatározása.....	36
5. Kísérletek módszerek és anyagok.....	39
5.1. Penetrációs készülékek tervezése.....	39
5.1.1. Penetrációs készülék állandó hőmérsékletű vizsgálatokhoz.....	39
5.1.2. Penetrációs készülék hőmérséklet-gradiens hatásának tanulmányozására.....	41
5.1.3. A hőmérsékletmező rekonstrukciója és a hőmérséklet-gradiens alatti mérések kiértékelési módszere.....	42
5.2. Kísérletekhez felhasznált anyagok.....	44

5.2.1.	A PEEK bevonatos rézvezetők felületének UV-kezelése	45
5.3.	Anyagvizsgálatok.....	46
5.3.1.	Termofizikai tulajdonságok	46
5.3.2.	Felületi és szerkezeti vizsgálatok	47
5.3.3.	Villamos vizsgálatok.....	49
5.4.	Penetrációs kísérletek.....	50
5.4.1.	Izoterm penetrációs kísérletek a Washburn-modell kiterjesztéséhez.....	50
5.4.2.	Izoterm penetrációs kísérletek az UV-kezelés hatásának vizsgálatára	51
5.4.3.	Hőmérséklet-gradiens hatásának vizsgálata penetrációs kísérletekkel	51
6.	Primer eredmények és azok értékelése.....	53
6.1.	A gyanták termofizikai tulajdonságai	53
6.2.	Izoterm penetráció és modell validáció	59
6.2.1.	A penetrációs modell validálása izoterm körülmények között	59
6.2.2.	A penetrációs kinetika hőmérsékletfüggése.....	65
6.3.	UV-kezelés hatásának vizsgálata.....	67
6.3.1.	Felületi kémiai változások UV-kezelés hatására.....	67
6.3.2.	Penetrációs kinetika változása UV hatására.....	76
6.3.3.	Oxidáció és penetráció kapcsolata	78
6.3.4.	Dielektromos átütési szilárdság.....	80
6.3.5.	A komplex analízis.....	83
6.4.	Hőmérséklet-gradiens hatása	85
6.4.1.	Hőmérsékleteloszlás és hőmérséklet gradiens	85
6.4.2.	Penetrációs viselkedés hőmérséklet-gradiens jelenlétében.....	86
6.4.3.	Mobilitási paraméter	89
6.4.4.	Arrhenius-elemzés.....	90
6.4.5.	A számítási módszer validálása izoterm körülmények között	91
6.4.6.	A referencia és mért penetrációs idők összehasonlítása hőmérséklet-gradiens esetén	92
6.4.7.	Elméleti modell validációja.....	95
7.	Következtetések.....	96
8.	Tézisek.....	98
	Irodalomjegyzék.....	102

Ábrajegyzék

1. ábra Elektromotor állórészének sematikus ábrázolása hajtú tekercseléssel, a) lemezelt vasmag és a tekercsfej. b) a téglalap keresztmetszetű vezetők elrendezése a hornyokban.	11
2. ábra A horony szigetelő rendszerének sematikus ábrája, a horony keresztmetszetében: vasmag (szürke), a horonyszigetelő papír(barna), hajtú rézvezetők (arany) és a tekercselésben réseibe penetrált impregnáló gyanta (halvány sárga)	11
3. ábra Hajtútekercselt elektromos motorok gyártási folyamat diagramja	12
4. ábra Gyanta alapú állórész szigetelési folyamatok áttekintése [17]	13
5. ábra Csepegtetési impregnálás folyamata, tekercsfejek impregnálása [24]	14
6. ábra Határfelületi kapillaris erő, mint 3 fázis esetén a fő határfelületre merőleges erő [61]	16
7. ábra Penetrációs idők elméleti összehasonlítása, gradiens mentes és gradiens melletti esetekben	33
8. ábra A penetrációs időnövekmény $x = 0,1$ m-en számítva a hőmérséklet-gradiens függvényében, az 7. ábrán megadott adatokkal számolva (elméleti görbe, az 20j és 15c egyenletekből számolva)	34
9. ábra Speciális esetet, ahol pozitív hőmérséklet-gradiens mellett létezik egy olyan x_{kr} penetrációs hossz, amelyhez közelítve a 500 K/m esetben a penetrációs idő a végtelenbe tart, ami a kapillaris hajtóerő megszűnésére utal. (elméleti görbék, a 20j és 15c egyenletekből számolva).....	35
10. ábra Kritikus hőmérséklet-gradiens, amelynél a hajtóerő nullához tart, így a penetrációs idő tart a végtelenbe, a kristikus-gradiens értékét függőleges szaggatott vonal jelzi. Az 1. táblázat adatait felhasználva, (elméleti görbe, a 20j és 15c egyenletekből számolva).....	36
11. ábra A penetrációs mérőberendezés. a) A mérőberendezés kialakítása b) A gyanta áramlásának és a kísérlet során ható erők sematikus ábrázolása, ahol F_c a határfelületi kapillaris erő, F_g a gravitációs erő, míg F_f a súrlódási erő c) A kísérleti elrendezés.....	40
12. ábra A hőmérséklet-gradiens hatásának tanulmányozására készült kísérleti berendezés sematikus ábrája a) A penetrációs készülék áttekintő képe, amelyen látható a folyadéktartály, a téglalap keresztmetszetű kapillaris kialakító köszörült acél elemek, valamint a rézből készült hőmérséklet-szabályozó elemek b) A berendezés metszeti nézete, amely szemlélteti a távtartó által meghatározott kapillarisrést, valamint a hőmérséklet-szabályozó elemek elrendezését c) A kapillaris részletrajza, amely bemutatja a téglalap keresztmetszetű kapillaris kialakítását, a távtartó lemez helyét és a kapillaris oldalainak tájolását.....	41
13. ábra Minták előkészítése és UV-kezelési elrendezés:a) PEEK bevonatú rézvezető keresztmetszete és méretei (mm) b) 100 mm hosszú egyenes minták penetrációs vizsgálatokhoz c) 500 mm hosszú, U-alakra hajlított minták villamos átütési vizsgálatokhoz d) UV-kezelés az UV-kabinban	45
14. ábra Az IEC 60851-5 geometriáján alapuló berendezés sematikus ábrája, amely a villamos átütési vizsgálati elrendezés szemléltetésére szolgál. D_1 és $D_2 \geq 5$ mm, $D_3 = 30$ mm, valamint $D_4 \geq 90$ mm.....	50
15. ábra EP-201 gyanta peremszögének koszinuszának hőmérsékletfüggése a hőmérséklet-gradiens behatását vizsgáló penetrációs készülék kapillarisának acél falán	56
16. ábra Az különféle gyanták viszkozitásának hőmérsékletfüggése a Vogel–Fulcher–Tammann modell alapján a) EP-201 b) V-4200.....	57
17. ábra Különféle gyanták a) felületi feszültségének és b) sűrűségének hőmérsékletfüggése.....	58
18. ábra A két gyanta $\sigma V^{2/3}$ értékének hőmérsékletfüggése az Eötvös-modell alapján	59
19. ábra A különféle gyanták mért és elméleti penetrációs úthosszának összehasonlítása a penetrációs idő függvényében 0,2 mm részmeret esetén. A négyzet alakú jelölők az 5. táblázatban szereplő kísérleti adatokat mutatják, míg a folytonos vonalak az elméleti görbéket jelölik. A kék görbe a (15c) egyenlet, a piros görbe pedig a (16e) egyenlet alapján számított	

eredményeket reprezentálja.a) EP-201 szobahőmérsékleten,b) V-4200 szobahőmérsékleten c) EP-201 80 °C-on,d) V-4200 80 °C-on.	64
20. ábra A mért és az elméleti penetrációs idők összehasonlítása.....	65
21. ábra A különféle gyanták penetrációs idejének hőmérsékletfüggése téglalap keresztmetszetű kapillárisban, különböző résméreték (mm) esetén. a) V-4200 b) EP-201	66
22. ábra Különböző impregnálógyanták penetrációs idejének természetes logaritmus az 1/T függvényében a) EP-201 b) V-4200.....	66
23. ábra A minták átlaghőmérsékletének időfüggése az UV-kezelés során.....	67
24. ábra Az UV-kezelés hatása a Raman- és FTIR-spektrumokra; a 33 J/cm ² fajlagos besugárzási energiájú és 110 mW/cm ² fajlagos intenzitású UV-kezelt minta (piros vonal) összehasonlítása a kezeletlen referencia mintával (fekete vonal). A csúcsok felett feltüntetett számok az azonosított jellegzetes hullámszámokat jelölik.....	68
25. ábra A kezeletlen és UV-kezelt PEEK minták C 1s XPS spektrumai és azok felbontása. a) A kezeletlen PEEK minta mért C 1s spektruma (fekete vonal), valamint annak felbontása háttérre és a különböző kötéseket reprezentáló alspektrumokra (kék, zöld és piros színekkel jelölve), továbbá ezek burkológörbéje (barna vonal). b) A 33 J/cm ² fajlagos besugárzási energiával, 110 mW/cm ² fajlagos intenzitású UV-kezelésnek kitett PEEK minta mért C 1s spektruma (fekete vonal), valamint annak felbontása háttérre és a különböző kötéseket reprezentáló alspektrumokra (bíbor, kék, zöld és piros színekkel jelölve), valamint ezek burkológörbéje (türkiz vonal).....	70
26. ábra A PEEK felületén kialakuló különböző szén- és oxigénkötések koncentrációi 110 mW/cm ² intenzitású UV-kezelés hatására.....	72
27. ábra A PEEK felületén kialakuló különböző szén- és oxigénkötések koncentrációja a különböző UV-kezelési intenzitások függvényében, 33 J/cm ² UV-besugárzási fajlagos energia mellett.	73
28. ábra A PEEK UV-indukált fotodegradációjának sematikus ábrája (Giancaterina és mtsai [101] alapján), kiemelve a fő felületi reakciókat – kötésszakadást és az azt követő oxidációt –, amelyek az FTIR-, Raman- és XPS-vizsgálatokkal kimutatott oxigéntartalmú funkciók csoportok kialakulásához vezetnek.	73
29. ábra A PEEK minták felületi morfológiája különböző UV- fajlagos besugárzási energia/intenzitás (J/cm ² / mW/cm ²) értékek mellett; a képek jelölése: Ref. (referencia minta), 33/110, 33/70 és 33/50, amelyek a megfelelő fajlagos energia/intenzitás értékeknek felelnek meg.	74
30. ábra A mért penetrációs idők különböző hőmérsékleten az UV-fajlagos besugárzás energiájának függvényében, 110 mW/cm ² intenzitás mellett (az adatok az 15. táblázat Össz. sorából származnak).	77
31. ábra A PEEK felületén lévő karboxil- és karboxilátkötések koncentrációjának (at%) hatása az epoxi impregnálógyanta penetrációs idejére.....	79
32. ábra Az UV-kezelés hatása a PEEK dielektromos átütési szilárdságára a fajlagos besugárzás energiájának függvényében (a rombusz jelölők a referencia mintát, a négyzetek a 110 mW/cm ² , a körök a 70 mW/cm ² , a háromszögek pedig az 50 mW/cm ² fajlagos intenzitásokat jelölik; különböző besugárzási teljesítmények esetén, az értékek az ábrán láthatók).....	81
33. ábra A karboxil- és karboxilátcsoportok koncentrációjának hatása a 110 mW/cm ² fajlagos intenzitással kezelt PEEK dielektromos átütési szilárdságára különböző UV-fajlagos besugárzási energiák mellett (a rombusz jelölők a referencia mintát jelölik, lásd a 16. táblázatban).....	82
34. ábra Az UV-besugárzás fajlagos intenzitásának hatása a PEEK dielektromos átütési szilárdságára.	82

35. ábra A penetrációs idő és a dielektromos átütési szilárdság kapcsolata különböző hőmérsékleteken, 110 mW/cm ² fajlagos UV-intenzitás mellett.....	84
36. ábra A kapilláris menti hőmérsékleteloszlás t = 1 s időpillanatban az O-110–60 kísérlet során. A mért adatok másodfokú polinommal kerültek illesztésre, amely alapján a lokális hőmérséklet-gradiensek meghatározásra kerültek.....	85
37. ábra A hőmérséklet-gradiens térbeli eloszlása a kapilláris mentén különböző időpontokban az O-110–60 kísérlet során. A gradiensek a mért hőmérsékletprofilokra illesztett polinomfüggvények deriválásával kerültek meghatározásra. A hőmérséklet-gradiens időben csökken.	86
38. ábra A penetrációs hossz négyzetének időfüggése nyitott kapilláris esetén a) izoterm és b) nem izoterm körülmények között. Az egyes értékek izoterm hőmérsékleteket (°C), míg a tartományok hőmérséklet-intervallumokat (°C) jelölnek gradiens kísérletekben.	88
39. ábra A penetrációs hossz négyzetének időfüggése zárt kapilláris esetén a) izoterm és b) nem izoterm körülmények között. Az egyes értékek izoterm hőmérsékleteket (°C), míg a tartományok hőmérséklet-intervallumokat (°C) jelölnek gradiens kísérletekben.	89
40. A mobilitási paraméter a reprezentatív hőmérséklet függvényében nyitott és zárt kapilláris konfigurációk esetén: a) izoterm, nyitott kapilláris; b) izoterm, zárt kapilláris; c) hőmérséklet-gradiens, nyitott kapilláris; d) hőmérséklet-gradiens, zárt kapilláris. A gradiens esetekhez tartozó értékek az alkalmazott hőmérséklet-tartomány átlaghőmérsékletével kerültek ábrázolásra.	90
41. ábra A mobilitási paraméter Arrhenius-ábrázolása nyitott és zárt kapilláris konfigurációk esetén izoterm körülmények között.....	91
42. ábra A referencia és a kísérletileg mért penetrációs idők összehasonlítása 100 mm penetrációs hossz esetén izoterm körülmények között. A folytonos vonal az 1 meredekségű vonalat (y = x) jelöli.	91
43. ábra A referencia (folytonos vonal) és a kísérletileg mért (négyzet pontok) penetrációs hossz négyzetének időfüggése reprezentatív kísérletek esetén pozitív hőmérséklet-gradiens mellett: (a) O-45–85, (b) O-40–90, (c) C-45–60.....	93
44. ábra A referencia (folytonos vonal) és a kísérletileg mért (négyzet pontok) penetrációs hossz négyzetének időfüggése reprezentatív kísérletek esetén negatív hőmérséklet-gradiens mellett: (a) O-110–60, (b) C-80–50, (c) C-120–50.	94
45. ábra A kísérletileg mért és a számított penetrációs idők közötti relatív eltérés függése az alkalmazott hőmérséklet-gradiens függvényében. A pozitív gradiens a penetráció lassulását, míg a negatív gradiens gyorsulását eredményezi. Az izoterm referenciaesetek (G = 0) pontjai az eltérés körül helyezkednek el, valamint a kritikus gradiens K=365 K/m és az emiatt a vizsgálatból kizárt mérési pont (piros négyzet).....	95

1. Bevezetés

A globális éghajlatváltozás az ipari fejlődés egyik legjelentősebb következménye. Az iparágak által kibocsátott üvegházhatású gázok, különösen a CO₂ és a NO_x, a Föld átlaghőmérsékletének emelkedéséhez vezettek. Ennek mérséklésére több nemzetközi egyezmény született, amelyek közül kiemelkedik a párizsi klímaegyezmény [1]. Az ehhez kapcsolódó szabályozások eredményeként az Európai Unióban 2035 után új belső égésű motor csak CO₂-semleges üzemanyag alkalmazása esetén helyezhető forgalomba. Ennek hatására az európai járműipar a villamos és hibrid hajtású járművek fejlesztése felé fordult.

Az elektromos járművek megjelenése ugyanakkor új gyártástechnológiai problémákat is felszínre hozott. Ide tartozik a ritkaföldfémek alkalmazása és azok árának változása, a komplex gyártási folyamatok, a magas energiaigény, valamint az ezekből fakadó selejtarány és költségszint. A villamos motorok gyártása során különösen kritikus lépés az állórész tekercselésének impregnálása, amely egyszerre idő- és energiaigényes folyamat. A folyamat sztochasztikus jellege miatt gyakran tapasztalhatók véletlenszerű hibák, miközben az impregnálás minősége közvetlen hatással van a motor élettartamára és üzembiztonságára.

Impregnálási technológiát fejlesztő mérnökként doktori kutatásaimat ezen folyamat jobb megértésének szenteltem. A kutatás során elsősorban a folyadékpenetráció jelenségét vizsgálom olyan egyszerűsített geometriákban, amelyek jól közelítik a tekercselések közötti kialakult hézagokat, amelyeket az impregnálás során gyantával impregnálnak. Ennek keretében téglalap keresztmetszetű kapillárisokban tanulmányozom az impregnáló gyanták penetrációjának kinetikáját és dinamikáját, különös tekintettel a geometria, a nedvesíthetőség és az időbeli lefolyás szerepére.

A klasszikus kapilláris nedvesítésen túl kutatásaim egyik fontos iránya a folyamat aktív befolyásolása. Hőmérséklet-gradiens alkalmazásával a felületi feszültség térben megváltoztatható, amely Marangoni-áramlást hoz létre. Ezen jelenség lehetőséget kínál arra, hogy az impregnáló gyanta irányított módon, gyorsabban penetráljon be a tekercselésbe. A doktori munka során e megközelítés alkalmazhatóságát vizsgálom laboratóriumi környezetben, az impregnálási folyamatot imitáló készülékeken.

A folyadékdinamikai jelenségek mellett a szilárd felületek állapota is meghatározó. Ennek megfelelően kutatásaim kiterjednek poli(éter-éter-keton) röviden PEEK, alapú rézvezető szigetelőbevonatok UV-kezelésére, amelynek célja a felületi tulajdonságok és a gyantával való kölcsönhatás módosítása. A felületkezelés és a hőmérsékletvezérelt áramlás vizsgálata új

megközelítést jelent az impregnálási technológia fejlesztésében. A bemutatott eredmények a későbbi eljárásfejlesztési munka megalapozását szolgálják.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Elektromotorok felépítése és impregnálási technológiái

Az elektromotorok felépítése és az alkalmazott impregnálási technológiák alapvetően meghatározzák a berendezések működését és megbízhatóságát. A következőkben röviden áttekintem az elektromotorok felépítésének főbb elemeit, valamint a tekercselések szigetelésében alkalmazott impregnálási eljárásokat. Ezen alapok bemutatása szükséges a későbbi fejezetekben tárgyalt folyamatok és jelenségek értelmezéséhez.

2.1.1. Elektromobilizáció és elektromotorok fejlesztési tendenciái

A javuló gazdasági helyzet következményeképpen a jármű eladások száma szignifikáns növekedést mutat. Azonban, fosszilis tüzelőanyag hajtotta járművek szén-dioxidot és nitrogén-oxidokat bocsájtanak ki, melyek üvegházhatást idéznek elő a bolygónk klímáján továbbá károsak az emberi egészségre nézve is. Az óriási mértékű dízel fogyasztás pedig globális szintű energia válságot idézett elő [2]. Különböző statisztikák szerint a fosszilis tüzelőanyagok növekvő felhasználásának kétharmada a szállítmányozásból származik, amely nem kívánt az emberi társadalmak fejlődésének és a fenntartható jövő elérésének szempontjából. Ennek érdekében nemzetközi összefogás keretén belül megszületett a Párizsi Klíma egyezmény, amely célja, hogy csökkentse a nemzetek károsanyag kibocsátását, valamint a globális átlaghőmérséklet értékét 1,5 °C alatt tartsa, az ipari forradalom előtti szinthez. E megállapodás következtében a járműipar a belső égésű motorok további fejlesztési irányáról áttért a villamos motorok, továbbá a villamos hajtásláncok fejlesztésére, valamint előállítására [3,4].

A villamos járművek hatótávjának növelése az egyik legfontosabb aspektusa jelenleg a villamos hajtások fejlesztésének. A belsőégésű motorokhoz képest ugyanis jelentősen alacsonyabb a hatótávolságuk. Ezt hatásfok növeléssel, tömegcsökkentéssel és akkumulátor technológia fejlesztéssel kívánják a mai modern járműgyártók feloldani. A hatásfok növelés és tömegcsökkentés miatt a gyártók próbálják motorjaikat a lehető legkompaktabbá tervezni. Ennek eredményeképpen egyre csökkenő térbe próbálnak egyre növekvő teljesítményt bevezetni, az az a villamos motorok teljesítmény sűrűségét igyekeznek növelni [5]. Ez számos problémához vezet, többek között, növekszik a villamos szigetelés terhelése, valamint az alkatrészek hőterhelése is, ami negatív hatással van a szigetelésre. Ez hatásfokvesztéshez vezet,

továbbá balesetekhez is hozzájárulhat. Következésképpen a motorok termo-menedzsmentje kulcskérdés a motorok üzemeltetése szempontjából. Így tehát kiemelten fontos a motorok tekercseléseinek fejlődő hő elvezetése. Nagy frekvenciájú működtetés során pedig rész kisülés történhet a motor állórészének szigetelő rendszerében, amely a szigetelés degradációjához vezet. Ez a folyamat rövidzárhoz, majd végül elektromos meghibásodáshoz vezet [6,7].

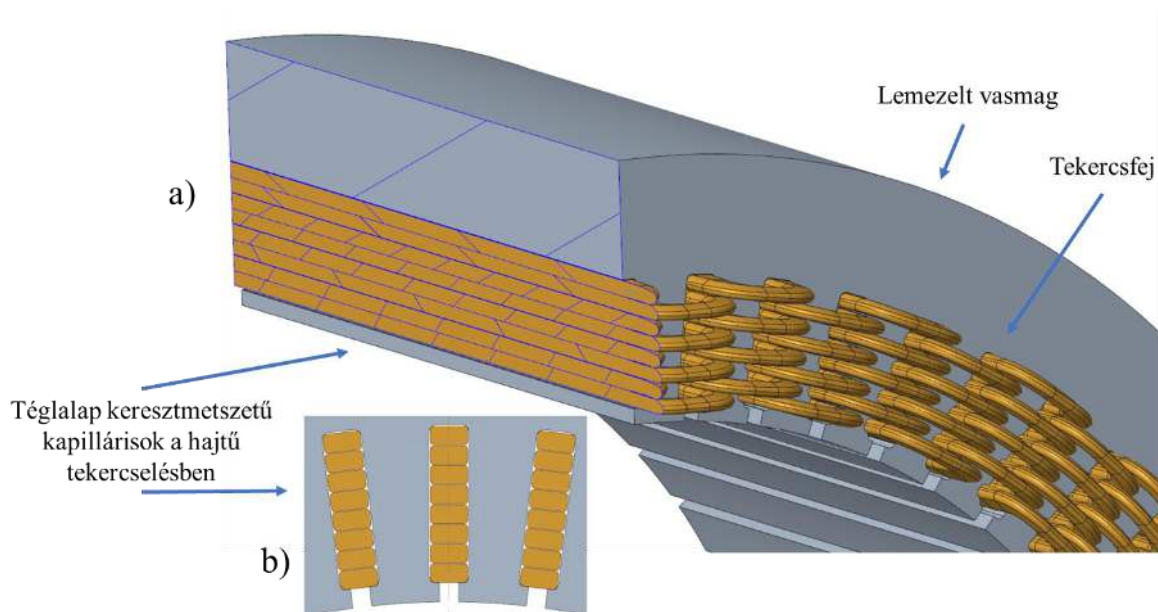
A villamos járművek működésük során neheztítő működési körülményeknek vannak kitéve. Üzemkörülményeik frekvenciánál változnak, beleértve a megállás, elindulás, nagymértékű gyorsulás/lassulás, nagy nyomaték alacsony sebességnél és magas teljesítmény nagysebességű emelkedés esetén, magas teljesítmény sűrűség, alacsony vibráció és zaj, magas megbízhatóság és élettartam, továbbá magas teljesítmény kontra ár arány mind követelményei az autó iparnak. Ezen okokból kifolyólag óriási nyomás van a jármű gyártókon a költségek csökkentésére. Így tehát a villamos motorok szigetelő rendszerének további fejlesztése elengedhetetlen az egyre növekvő elvárások és igények kiszolgálása érdekében, amely a szigetelőképeség növelésére és a fejlődő hő elvezetésére fókuszál [8,9].

2.1.2. Villamos motorok szigetelő rendszerének felépítése

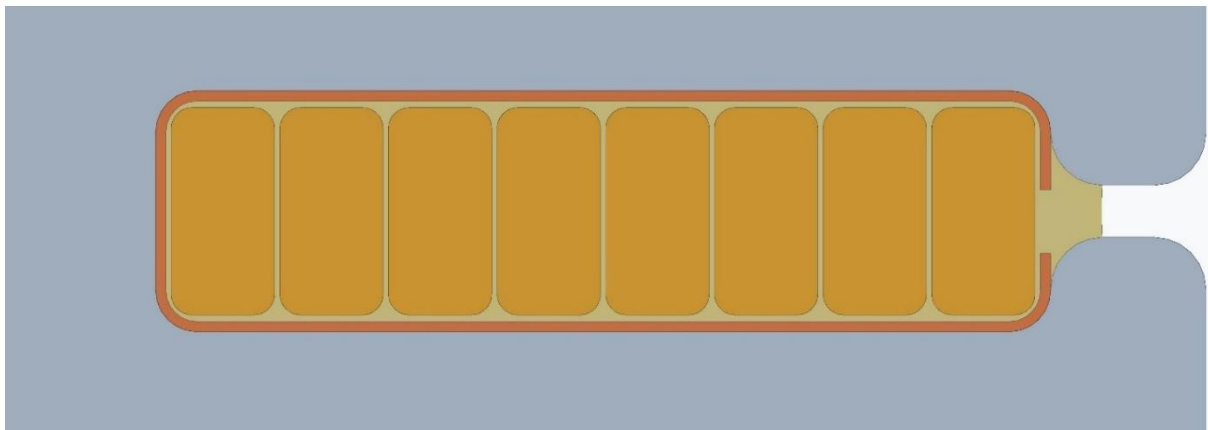
Korábban a tömeg gyártott elektromos motorok állórészében körkeresztmetszetű rézvezető huzallal volt kialakítva a tekercselés. Ennél a tekercselési kialakításnál a menetek véletlenszerűen helyezkedtek el a vasmag hornyain belül. Mára azonban a modern járműhajtásokban szinte kizárólagosan csak úgynevezett „hajtű” (angolul „hair pin”) technológiás állórésztekercselések vannak. A technológiának köszönhetően magasabb motor fordulatszámokon is az áram egyenletesebben van eloszlva a hornyon belül, azaz jobbak a villamos tulajdonságai, valamint jobb a horony térkitöltése is. A hajtű rézvezetők elhelyezkedése a vasmag hornyáiban, illetve a villamos motor sematikus ábrája az 1. ábrán látható.

A réz vezetőkön jellemzően huzalszigetelő anyag van, jellemzően PEEK (poli(éter-éter-ke-ton)) vagy PAI (poliamid-imid) szigetelés. A vasmagok hornyáiban pedig papír horonyszigetelő van. A papír feladata, hogy szeparálja a réz vezetőket a vasmagtól. Maga a papír jellemzően egy műanyag horonyszigetelő, papír bevonattal. A hornyok szigetelésének rendszerét a 2. ábra mutatja be. A tekercselés kialakítását követően, a vasmag hornyáiban a tekercselés körül, az illesztések miatt levegővel teli zsebek alakulnak ki. A levegő rossz hővezetése, továbbá dielektromos tulajdonságai miatt, magát a tekercselést impregnálják különféle, erre a célra

kialakított szigetelő gyantákkal. Jellemzően epoxy, vagy poliészter bázisú gyantákat használnak.



1. ábra Elektromotor állórészének sematikus ábrázolása hajtú tekercseléssel, a) lemezelt vasmag és a tekercsfej. b) a téglalap keresztmetszetű vezetők elrendezése a hornyokban.

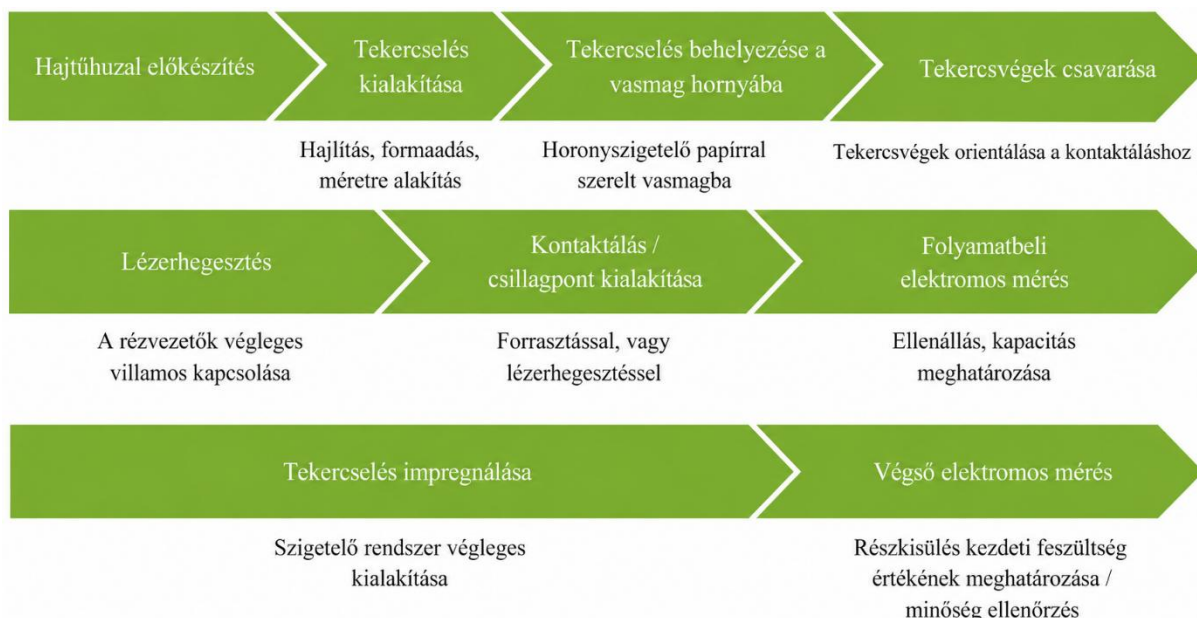


2. ábra A horony szigetelő rendszerének sematikus ábrája, a horony keresztmetszetében: vasmag (szürke), a horonyszigetelő papír(barna), hajtú rézvezetők (arany) és a tekercselésben réseibe penetrált impregnáló gyanta (halvány sárga)

2.1.3. Hajtú tekercseléssel készített elektromos motor gyártási folyamata

A hajtú tekercselésű villamos motorok gyártása egy összetett, egymásra épülő technológiai folyamatláncon keresztül valósul meg, amelynek célja a nagy térkitöltési tényező, a magas teljesítménysűrűség és a reprodukálható minőség biztosítása. Az elektromos motorok gyártási folyamat diagramját a 3. ábra mutatja be. A gyártás a lapos rézhuzal előkészítésével kezdődik,

amely során az egyengetés célja a maradó feszültségek csökkentése és a geometriai pontosság biztosítása, miközben a szigetelés sértetlenségét meg kell őrizni. Ezt követi a szigetelés célzott eltávolítása a későbbi elektromos kontaktusok helyén, amely különböző mechanikai, termikus vagy lézeres eljárásokkal történhet, szigorú minőségi követelmények mellett. A huzal darabolása és hajlítása során alakul ki a hair-pin tekercsek térbeli geometriája, ahol a hajlítási sugarak és a szigetelés mechanikai igénybevétele kritikus szerepet játszik. A kialakított tekercsek ezt követően meghatározott sorrendben kerülnek elrendezésre és behelyezésre az állórész szigetelt hornyaiba, ahol a szűk tűrések miatt a geometriai pontosság alapvető feltétel. A tekercsvégek csavarása (angolul „Twisting”) a különböző rétegek elektromos összekapcsolását készíti elő, amely során a vezetővégek pozícióját és orientációját nagy pontossággal kell beállítani. Az ezt követő kontaktálás során hegesztési vagy forrasztási technológiák biztosítják a mechanikailag stabil és alacsony átmeneti ellenállású elektromos kapcsolatokat, amelyek a motor későbbi üzemi viselkedését alapvetően meghatározzák. A gyártásközi villamos mérések szolgálnak a hibák korai kiszűrésére, majd a tekercsvégek mechanikai rögzítése következik a geometriai stabilitás biztosítása érdekében. A folyamat végén az impregnálás, mint utolsó, minőség szempontból meghatározó lépés jelenik meg, amely a korábbi gyártási műveletek során kialakított elektromos és geometriai állapotot rögzíti, és döntően befolyásolja a kész villamos motor élettartamát és üzembiztonságát [10–15].



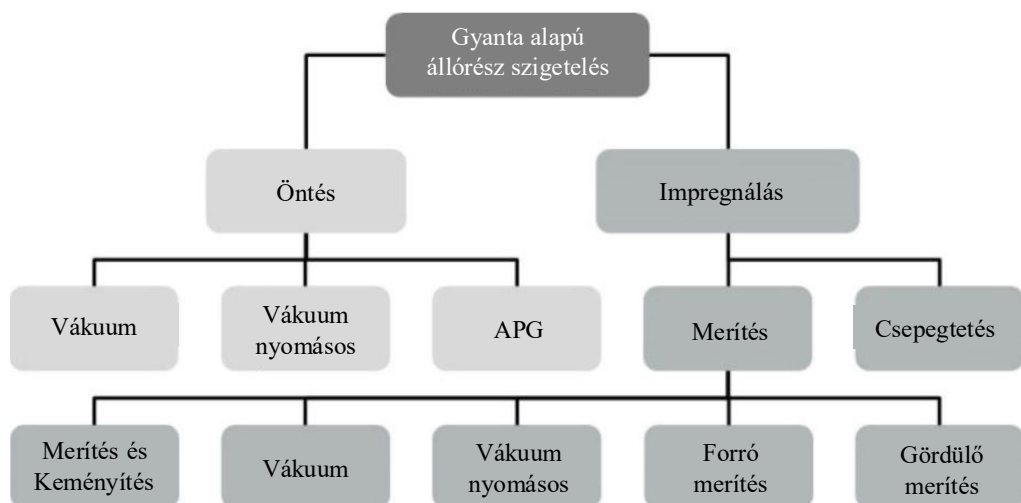
3. ábra Hajtútekercselt elektromos motorok gyártási folyamat diagramja

2.1.4. A tekercselés impregnálása

Mint az az előző fejezetben kifejtésre került, a tekercsszigetelés kialakításának utolsó lépése az impregnálás. Az elektromos motorok állórészének impregnálása, mint egy lépcsős megmunkálási eljárás, számos követelményt kell, hogy teljesítsen. A térhálósodott gyanta rögzíti mechanikusan a tekercselést, amely meggátolja, hogy a bevont rézvezetők vibráció következtében megsérüljenek. Ezenfelül, a szigetelés villamos tulajdonságai tovább javulnak az impregnálás hatására. Ennek eredményeképpen a részkisülések kezdeti feszültség értéke (angolul „partial discharge initiation voltage”, PDIV) nő, továbbá a tekercselés átütési szilárdsága javul [16,17]. Mindemellett a gyanta javítja a tekercselés védelmét a környezeti behatásoktól, mint például a hajtómű olajtól, melyet a tekercsfejek hűtésére használnak a járművekben. Az előbb említett jellemzők mind pozitívan járulnak hozzá a villamos motorok éltartamához. Egy további fontos előnye a kellőképpen impregnált állórésznek az, hogy a gyanta hővezetőképessége tízszer magasabb, mint a levegőé. Mivel a tekercselés hőmérséklete a villamosmotor egyik legnagyobb veszteség forrása, ezért a tekercselés hűtése elengedhetetlen a megfelelő üzemi körülmények elérése szempontjából. A tekercselés hűtése gyakran a vasmagon keresztül történik, így a rézvezetők és a vasmag közötti hőátadás fontos tényező az elektromos gépek hőtani tulajdonságaiban [18,19].

2.1.5. Különböző impregnálási eljárások és a csepegtetési impregnálás

A villamosmotor állórészének gyantaalapú másodlagos szigetelése többféle impregnálási eljárással valósítható meg, ahogy az a 4. ábrán látható. Az alkalmazott technológiák alapvetően merítési és csepegtetési eljárásokra oszthatók. Merítési impregnálás során az állórész teljes egészében a gyantába kerül, így a folyadék minden oldalról körülveszi.



4. ábra Gyanta alapú állórész szigetelési folyamatok áttekintése [17]

Csepegtetési impregnálás során vékony folyadéksugár formájában kerül a gyanta az állórész tekercsfejeire, miközben az állórészt forgatják [17–23]. A gyanta a csepegtetés oldalán a határfelületi kapilláris erők hatására jut be a vasmag hornyaiba. A folyadékoszlop teljes penetrációját követően a szemközti tekercsfej impregnálása valósul meg.

Az impregnálás során az állórész 5–20°-os szögben megdöntésre kerülhet, amely lehetővé teszi, hogy a kapilláris erők mellett a gravitációból származó súlyerő is hozzájáruljon a folyadék transzportjához. A folyamat során a lamellált vasmag külső és belső felülete nem kerül közvetlen érintkezésbe a gyantával, így ez az eljárás a tisztább impregnálási technológiák közé tartozik. Emellett a felhasznált gyanta mennyisége jól szabályozható.

A végső kikeményítés hő hatására, vagy kemencés hőkezeléssel történik. A csepegtetési impregnálás folyamatát az 5. ábra szemlélteti. A továbbiakban a vizsgálatok a csepegtetési eljárásra kerülnek korlátozásra. [17,22,23].



5. ábra Csepegtetési impregnálás folyamata, tekercsfejek impregnálása [24]

2.2. Határfelületi kapilláris erő és kapillárisba történő gyanta penetráció

Az impregnálási folyamat során a határfelületi kapilláris erő hatására, az impregnáló gyanta a hajtútekercselés réseibe penetrál. A határfelületi erők alapvető elméleti leírását Young [25] és Laplace [26] fektette le. Azóta számos tanulmány foglalkozott a határfelületi jelenségek áttekintésével [27–33]. A határfelületi erők általános levezetését és egységes matematikai keretét Kaptay dolgozta ki [34]. Első lépésként, írjuk fel a rendszer teljes határfelületi energiáját (G_σ , J) [34,35]:

$$G_\sigma = \sum_{i,j} A_{i/j} \cdot \sigma_{i/j} \quad (1)$$

ahol i és j a különböző fázisokat jelölik, $A_{i/j}$ (m^2) az i/j fázishatár határfelületének területe, míg a $\sigma_{i/j}$ (J/m^2) az adott fázisok közötti határfelületi energia. Newton és Gibbs megközelítését követve az x irányban a kiválasztott fázisra ható határfelületi erő a G_σ szerinti negatív deriváltaként határozható meg [34,35]:

$$F_{\sigma,x} = -\frac{dG_\sigma}{dx} \quad (2)$$

Az (1) egyenletet a (2) egyenletbe behelyettesítve a következő általános összefüggés adódik [34,34]:

$$F_{\sigma,x} = -\sum_{i,j} \sigma_{i/j} \cdot \frac{dA_{i/j}}{dx} - \sum_{i,j} A_{i/j} \cdot \frac{d\sigma_{i/j}}{dx} \quad (3)$$

A (3) egyenletből az összes különféle határfelületi erő levezethető [35]. A (3) egyenletből levezethető a határfelületi kapilláris erő, amely leírja azt a mechanizmust, amely a csepegtetési impregnálás során az impregnáló gyanta penetrációját eredményezi a tekerceselés szerelés után maradt réseibe. A kör keresztmetszetű kapillárisokban a folyadék/gáz határfelületen ébredő határfelületi kapilláris erő általános alakja ($F_{s/lg}^{cap}$, N) a következőképpen írható fel [36]:

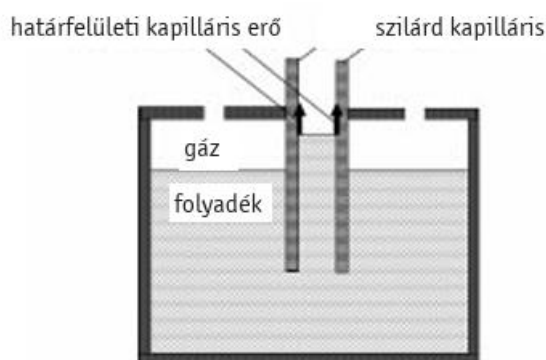
$$F_{s/lg}^{cap} = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta \quad (4)$$

ahol az alsó indexek jelentése: (s) szilárd, (l) folyadék és (g) gáz, r (m) a kapilláris sugara, σ_{lg} (J/m^2) a folyadék felületi feszültsége, míg θ (fok) a folyadék nedvesítési peremszöge a kapilláris belső falán, normál atmoszférán. Ez az erő a folyadékot a kapillárisba húzza, ha nedvesítési peremszöge $\theta < 90^\circ$, míg $\theta > 90^\circ$ esetén a folyadékot kifelé tolja a kapillárisból [36].

A határfelületi kapilláris erő számos alkalmazási területen játszik szerepet, többek között mikrofluidikai eszközökben [37,38], nanotechnológiai rendszerekben [39], porózus közegekben történő folyadékpenetrációnál [40], talajok és felületek víztaszító viselkedésének vizsgálatánál [41], hőcsövekben [42], nyomtatott elektronikában [43], valamint számos egyéb alkalmazásban [44]. A kapillárisokban történő folyadékáramlás dinamikáját elsőként Lucas [45] és Washburn [46] írta le. Kimutatták, hogy az áramlást körív alakú meniszkusz által létrehozott kapillárisnyomás-gradiens határozza meg. Ennek alapján a folyadékfront helyzetére (x , m) a (t , s) idő függvényében, vízszintes elhelyezésű, r sugarú hengeres kapillárisok esetén a következő összefüggést írja le:

$$x^2 = \frac{r}{2 \cdot \eta} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta \cdot t \quad (5)$$

ahol η (Pas) a folyadék dinamikai viszkozitása. Az egyenlet átalakítható $z = \sqrt{kt}$ alakú analitikus megoldássá, amely Lucas–Washburn-összefüggésként ismert, ahol a k mobilitási paraméter diffúziós együtthatóként értelmezhető, amely a folyadékhatárfelület előrehaladását hajtja. Számos tanulmány épített ezekre az eredményekre az inerciális hatások figyelembevételével [47,48], a dinamikus nedvesítési peremszög hatásának bevonásával [49,50], valamint a felületi érdesség szerepének vizsgálatával [51,52], továbbá kiterjesztette a Lucas–Washburn-modellt különböző keresztmetszeti geometriákra [51,53]. Mivel a kapilláris effektus széles körben alkalmazott határfelületi jelenség, annak behatásának fokozását is számos szerző vizsgálta [54–57], miközben a dinamikus nedvesítési peremszög [58,59] és a résméret hatását [60] szintén elemezték az optimalizált folyamatok esetében. A határfelületi kapilláris erő sematikus ábrája a 6. ábrán látható.



6. ábra Határfelületi kapilláris erő, mint 3 fázis esetén a fő határfelületre merőleges erő [61]

A kapillárisok zárt és nyitott típusokra oszthatók [62]. A litográfias gyártástechnológiák lehetővé tették mára a különböző keresztmetszetű nyitott mikrocsatornák létrehozását, például téglalap [63], amely széles körben elterjedt a mikrofluidikai eszközökben, trapéz alakú [64], U-alakú [65] és V-alakú [66] geometriák. A nyitott mikrocsatornában kialakuló kapilláris áramlást számos tényező befolyásolja, ezért a jelenség összetettebb, mint zárt csatornák esetén, ami az elméleti modellek és a kísérleti megfigyelések közötti eltérésekhez vezethet [51,53,59,65]. A párolgás jelentős hatással van a folyadékáramlásra nyitott mikrocsatornában, mivel a felső határfelület hiánya összetett szabadfelszín-geometriát eredményez, ami kedvezőtlen hatással lehet például mikrofluidikai diagnosztikai alkalmazásokra [67]. A mikrocsatornában áramló oldatok viselkedésének és párolgásának jobb megértése érdekében Kolliopoulos és munkatársai [68] egy új modellt dolgoztak ki, amely olyan tényezőket is

figyelembe vesz, mint az egyenlőtlen párolgás és a hőmérsékletváltozás, amelyek a korábbi vizsgálatokban nem szerepeltek.

Kolliopoulos és munkatársai [69] nyitott, téglalap keresztmetszetű mikrocsatornában vizsgálták a kapilláris áramlás dinamikáját elméleti és kísérleti módszerekkel. Eredményeik szerint a kenélméleten (angolul „lubrication theory”) alapuló modell pontosabban írja le ezen transzport folyamatot, különösen kisebb oldalarányok és nedvesítési peremszögek esetén, miközben rávilágít a módosított Lucas–Washburn-modell (MLW) korlátaira is. A Seemann és munkatársai [70] által meghatározott szabadfelszín-morfológiai tartományokat bemutató morfológiai diagramok alapján a kenélméleten alapuló modellt vezettek be. A modellük jobb egyezést mutat a kísérleti eredményekkel, alacsonyabb λ (szélesség/magasság) oldalarány és θ_0 értékek mellett. Ennek ellenére pontossága csökken, amikor θ_0 megközelíti a 45° értéket, elsősorban az axiális görbület figyelembevételének hiánya miatt. Ezzel szemben az MLW modell nagyobb λ és θ_0 értékek esetén ad megbízhatóbb eredményt, azonban kisebb oldalarányoknál pontossága jelentősen romlik, ami rámutat a szabadfelszín összetett morfológiájának szerepére a nyitott, téglalap keresztmetszetű mikrocsatornában kialakuló kapilláris áramlás leírásában.

Tas és munkatársai [71] kimutatták, hogy nanocsatornában a kapilláris penetráció sebessége az elvártnál lassabb az elektroviszkózus hatás miatt, különösen kisebb csatornaméretek esetén. Ezt a jelenséget mikrocsatornában [72], valamint nano-csatornában [73,74] is vizsgálták. Chang és munkatársai [75] a téglalap keresztmetszetű mikrocsatornák falai mentén térben változó nedvesítési peremszögek hatását elemezték a penetráció sebességre. Megállapították, hogy a maximális penetrációs sebesség különösen érzékeny a fal menti nedvesítési peremszögek változására abban az esetben, ha a csatorna oldalfalain és alján azonos nedvesítési peremszög érvényesül.

Tudáshiány: Bár a kapilláris penetráció összefüggései elméleti szinten tetszőleges keresztmetszetű kapillárisokra levezethetők, ezekből jelenleg nem áll rendelkezésre egyszerű, ipari környezetben közvetlenül alkalmazható számítási képlet. Téglalap keresztmetszetű mikrocsatornákra ugyan léteznek modellek, ezek azonban nem ültethetők át közvetlenül a hajtű tekercselésű villamos motorok impregnálására. Ebben az esetben a kapilláris keresztmetszetén belül eltérő nedvesítési peremszögek alakulnak ki az egyes határfelületeken, továbbá a geometriai lépték is nagyobb, ezért a gravitáció hatása sem hanyagolható el. Ennek következtében jelenleg hiányzik egy olyan egyszerű, iparban közvetlenül használható modell,

amely megbízhatóan képes előre jelezni a penetrációs időt, téglalap keresztmetszetű kapillárisokban.

Az impregnálógyanta penetrációjának optimalizálása több, egymással összefüggő fizikai és határfelületi jelenség együttes figyelembevételét igényli. A következőkben azon szakirodalmi eredményeket tekintem át, amelyek a polimer felületek – különösen a poli(éter-éter-ke-ton) (PEEK) alapú szigetelőbevonatok – UV-kezeléssel elérhető módosításait, valamint a hőmérséklet-gradiens által létrehozott határfelületi és áramlási jelenségeket vizsgálják az impregnálási folyamat szempontjából. Az áttekintés célja e két megközelítés elméleti megalapozása, valamint azok szerepének bemutatása a penetrációs viselkedés javításában.

2.3. PEEK rézvezető szigetelő bevonatának UV kezelése

A poliéter-éter-ke-ton (PEEK) egy nagy teljesítményű, félkristályos hőre lágyuló polimer, amely kedvező mechanikai tulajdonságai és magas hőstabilitása miatt széles körben alkalmazott anyag az autóiparban, a repülőgépiparban és az orvostechikában [76–80]. A járműipari alkalmazásokon belül a PEEK egyre gyakrabban jelenik meg hajtú tekercselésű elektromos motorok szigetelőanyagaként, ahol az elektromos hajtások terjedésével együtt növekvő villamos és termikus igénybevételeknek kell megfelelnie [4,17,19,78,81–85]. A villamos motorok tekercselései jellemzően réz- vagy alumíniumvezetők-ből készülnek, amelyeket polimer alapú szigetelőbevonat fed [81]. Az impregnálási folyamat során kialakuló szigetelőrendszer végső minősége nagymértékben függ a szigetelőanyag felületi tulajdonságaitól és azok kölcsönhatásától az impregnáló gyantával. Ennek megfelelően jelen munkában a PEEK alapú szigetelőbevonatok UV-kezelésével létrehozott felületi módosítások kerülnek vizsgálatra, különös tekintettel azok impregnálási folyamatra gyakorolt hatására.

Kémiai felépítéséből adódóan – amely aromás gyűrűket és ke-ton csoportokat tartalmaz – a PEEK eredendően hidrofób és kémiailag inert anyag, alacsony felületi energiával rendelkezik. Ez jelentősen korlátozza kölcsönhatását a poláris folyadékokkal, például az impregnáló gyantákkal, és gyenge adhéziót eredményez [76,86–89]. Ennek javítására számos felületmódosítási eljárást fejlesztettek ki a polimerek nedvesíthetőségének és adhéziós tulajdonságainak növelésére [89], többek között felületgraftolást [90], koronakisülé-ses kezelést [91], plazmakezelést [92,93], lézeres felület kialakítás[94,95], valamint ultraibolya (UV) felületkezelést [96,97]. Ezek az eljárások poláris funkciós csoportokat hoznak létre a polimer felületén, amelyek növelik a felületi energiát, és ezáltal javítják a gyanták nedvesítését és adhézióját[98–100].

Ezen eljárások közül az UV-kezelés egyszerűen megvalósítható és jól skálázható felületmódosítási módszer, amelyet széles körben alkalmaznak különböző iparágakban. Giancaterina és munkatársai [101] polikromatikus UV-besugárzás hatását vizsgálták PEEK felületeken, és jelentős fotokémiai degradációt figyeltek meg, amelynek során alacsony molekulatömegű termékek, például szén-dioxid, karbonil csoportok és karbonsavak keletkeztek. Az UV-indukált oxidáció következtében a felületi oxigéntartalom növekszik, és jellemzően 4–5 perces kezelés után mintegy 30 atom százalék körüli telítési értéket ér el. Ennek eredményeként a víz nedvesítési peremszögének csökkenése figyelhető meg, ami a felület polaritásának és nedvesíthetőségének javulására utal [102–104].

A plazmakezelés ugyan hatékony felületmódosítási eljárás, azonban gyakran a felületi érdesség növekedésével jár, ami bizonyos alkalmazások esetén kedvezőtlen hatású lehet [105]. Ezzel szemben az UV-besugárzás során létrejövő aktív oxigénspeciest (angolul Active Oxygen Species az az AOS) alkalmazó módszerek képesek a felületi funkcionalitás növelésére a felület simaságának megőrzése mellett [106,107]. Yoshida és munkatársai [108] például kimutatták, hogy az UV–AOS kezelés jelentősen javítja a rézbevonatok tapadását PEEK felületeken, ahol az adhéziós energia elérte a $0,15 \text{ J/m}^2$ értéket. A plazmakezeléssel módosított felületekkel szemben az AOS-kezelésen átesett felületek simábbak maradtak, ami különösen előnyös olyan alkalmazásokban, mint például a nyomtatott áramkörü lapok, ahol az alacsony felületi érdesség kritikus követelmény.

A PEEK kiemelkedő dielektromos tulajdonságokkal is rendelkezik, ami alkalmassá teszi villamos szigetelőanyagként történő alkalmazásra. Giants és munkatársai [109] kimutatták, hogy a kristályosság csökkenése a dielektromos átütési szilárdság romlásához vezet, míg Ho és munkatársai [110] hasonló hatást figyeltek meg emelt hőmérsékleten.

Ugyanakkor a nedvesíthetőséget javító felületmódosítások a dielektromos tulajdonságokra is hatással lehetnek. Asada és munkatársai [111] például kimutatták, hogy az oxidált alacsony sűrűségű polietilén (LDPE) felületén megjelenő karbonilcsoportok alacsony koncentrációban töltéscsapdaként viselkednek, csökkentve a szivárgási áramot. Azonban, nagyobb koncentrációban villamos átütési (hopping) helyekké válnak, ami végső soron a dielektromos szilárdság csökkenéséhez vezet [111,112]. Tong és munkatársai [113] megállapították, hogy a karbonil funkciós csoportokat tartalmazó poliamidok kedvezőbb dielektromos tulajdonságokat mutatnak, amely a javított láncrendeződésnek és a megnövekedett dipólussűrűségnek tulajdonítható.

A PEEK-bevonatú rézvezető hajtú tekercsek által kialakított téglalap keresztmetszetű kapillárisokba történő impregnálógyanta-penetrációt a határfelületi kapilláris erő határozza meg, amely erősen függ a gyanta nedvesítési peremszögétől a hordozófelületen [31–34,36,114]. Ennek megfelelően bármely felületkezelés – beleértve az UV-besugárzást is – egyaránt befolyásolhatja a gyanta PEEK-hez való adhéziós energiáját és az impregnálási folyamat dinamikáját.

Tudáshiány: Bár az UV-kezelés hatását a PEEK felületi oxidációjára az irodalom részletesen vizsgálja, nem tisztázott, hogy ezek a felületi kémiai változások miként befolyásolják az impregnálógyanta penetráció kinetikáját és a kialakuló szigetelőrendszer dielektromos átütési szilárdságát. Különösen hiányzik egy szisztematikus elemzés, amely az UV-kezelés fajlagos besugárzási energiáját, illetve intenzitását a penetrációs viselkedéssel és a funkcionális villamos tulajdonságokkal kapcsolná össze.

2.4. Hőmérséklet-gradiens hatásának vizsgálata

A kapilláris erő által hajtott folyadékpenetráció számos mérnöki alkalmazásban meghatározó jelentőségű [18,27,86,89]. Izoterm körülmények között a folyamat a Young-féle nedvesítési feltétel [25] és a Laplace-féle görbületi nyomásösszefüggés [26] alapján írható le, ahol a felületi feszültség állandónak tekinthető, és a folyadék mozgását a kapilláris hajtóerő és a viszkozus ellenállás egyensúlya határozza meg. Ennek klasszikus leírása a Lucas–Washburn-összefüggés [45,46].

Nem izoterm körülmények között a folyamat lényegesen összetettebbé válik. A felületi feszültség hőmérsékletfüggése miatt térbeli gradiens alakulhat ki, amely további határfelületi hajtóerőt eredményez. Ezt a jelenséget Thomson és Marangoni írta le [115,116], és határfelületi szétterítő (Marangoni-) erőként ismert [36]. A folyadékok felületi feszültségének csökkenése a hőmérséklet növekedésével általában az Eötvös-összefüggéssel írható le [117–119], amelynek következtében a folyadék a magasabb felületi feszültségű tartományok felé áramlik, azért, hogy azokat lecserélje alacsonyabb felületi feszültségű folyadékkal [31,33].

A hőmérséklet-gradiens hatását több szerző is vizsgálta. Medina és munkatársai [120] elméleti modelljükben kimutatták, hogy a kapilláris penetráció dinamikája erősen függ a felületi feszültség és a viszkozitás hőmérsékletfüggésétől, és negatív hőmérséklet-gradiens esetén a folyadékpenetráció felgyorsulhat. Eredményeik szerint a klasszikus Washburn-törvény csak izoterm esetben érvényes, míg hőmérséklet-gradiens jelenlétében a folyadékfront előrehaladása jelentősen eltérhet attól.

Sahu és Duryodhan [121] kísérleti és numerikus vizsgálatai továbbá rámutattak arra, hogy a hőmérséklet-gradiens nemcsak a penetráció sebességét befolyásolja, hanem a meniszkusz dinamikáját is módosítja, és oszcillációs jelenségek kialakulásához vezethet. Kimutatták, hogy a hőmérséklet hatására a viszkozitás csökkenése csökkenti az áramlást gátló erőket, ami gyorsabb folyadék penetrációt eredményez, miközben az oszcillációk amplitúdója a gradiens függvényében változik, a frekvencia azonban nagyrészt a geometriai paramétereiktől függ.

A Marangoni-erőn alapuló áramlás gyakorlati alkalmazása különösen a mikrofluidikai rendszerekben vált jelentőssé, ahol a nagy felület/térfogat arány miatt a határfelületi erők dominálnak. Darhuber és munkatársai [122] kimutatták, hogy a felületi feszültség gradiensek lokális kialakításával a folyadékmozgás hatékonyan szabályozható mikro- és nano rendszerekben. Vizsgálataik célja olyan módszerek fejlesztése volt, amelyekkel a folyadék áramlása külső mechanikai hajtás nélkül irányítható és szabályozható. Eredményeik szerint a Marangoni-erőn alapuló áramlás különösen hatékony szabadfelszíni rendszerekben, ahol a felületi nyírófeszültségek közvetlenül mozgatják a folyadékot. A folyamat érzékeny a kontaktvonal dinamikájára, a nedvesítési hiszterézisre és a felületi mintázatokra, amelyek jelentősen befolyásolják a csepp- és filmmozgást.

Amador és munkatársai [123] kísérletileg demonstrálták, hogy hőmérséklet-gradiens hatására nemcsak lokális, hanem teljes keresztmetszetre kiterjedő (térfogati) áramlás is létrehozható mikroszatornákban, amennyiben a fal mentén folyadék–folyadék határfelületek vannak jelen. Vizsgálataik célja olyan passzív folyadékmozgatási módszer fejlesztése volt, amely külső szivattyú alkalmazása nélkül képes szabályozott áramlást létrehozni mikrofluidikai rendszerekben. Eredményeik szerint néhány °C/cm nagyságrendű hőmérséklet-gradiens hatására több tíz $\mu\text{m/s}$ sebességű áramlás hozható létre, amely lineárisan függ a felületi feszültség gradiens nagyságától. Kimutatták továbbá, hogy az áramlás iránya a felületi feszültség hőmérséklet koefficiensének előjelétől függ, így az alkalmazott folyadékpárok alapvetően meghatározzák a kialakuló áramlási viszonyokat.

Ezek az eredmények egyértelműen igazolják, hogy a határfelületi szétterítő erő nem csupán kiegészítő jelenség, hanem megfelelő geometriai és határfelületi feltételek mellett önálló hajtómechanizmusként is működhet. Ugyanakkor a legtöbb vizsgálat nyílt rendszerekre vagy speciálisan kialakított mikrofluidikai struktúrákra korlátozódik, és kevésbé ismert, hogy zárt, téglalap keresztmetszetű kapilláris geometriákban milyen módon módosítja a klasszikus kapilláris penetráció kinetikáját és dinamikáját. Mindezen eredmények ellenére a hőmérséklet-

gradiens hatása zárt, mérnöki szempontból releváns kapilláris geometriákban még nem kellően feltárt, különösen az impregnálási folyamatokhoz hasonló rendszerek esetén.

Tudáshiány: *Jelenleg nem áll rendelkezésre olyan, kísérletileg is alátámasztott elméleti leírás, amely a hőmérséklet-gradiens hatását kvantitatív módon kapcsolja össze a kapilláris penetráció dinamikájával és kinetikájával téglalap keresztmetszetű, zárt rendszerekben. Különösen nem ismert, hogy a szilárd-folyadék határfelületi energia gradiensekből származó határfelületi erők milyen mértékben módosítják a klasszikus Lucas–Washburn-modellt.*

3. A kutatás célja

A villamos motorok állórészének impregnálása olyan gyártástechnológiai lépés, amelynek minősége és időigénye döntően befolyásolja a késztermék üzembiztonságát és gyártási költségeit. A folyamat legkritikusabb eleme az impregnálógyanta penetrációja a tekercselések által kialakított szűk, összetett geometriájú terekbe, ahol az ipari környezetben alkalmazott impregnálási eljárások működése gyakran csak korlátozottan írható le a klasszikus kapilláris modellek segítségével. Jelen doktori kutatás célja ezen penetrációs folyamat fizikai hátterének vizsgálata, valamint olyan, ipari léptékben is alkalmazható összefüggések feltárása, amelyek támogatják az impregnálási technológia tervezését és optimalizálását.

A kutatás első célkitűzése a folyadék penetrációjának elemzése téglalap keresztmetszetű kapillárisokban, amelyek jó közelítést adnak a hajtú tekercselésű villamos motorokban kialakuló geometriai viszonyokra. A vizsgálatok célja annak feltárása, hogy a geometriai paraméterek és az anyagtulajdonságok miként határozzák meg a penetráció időbeli lefolyását, valamint egy egyszerű, mérnöki szempontból jól használható modell kialakítása a penetrációs idő előrejelzésére.

A kutatás második célkitűzése a PEEK alapú szigetelőbevonatok felületi állapotának szerepét vizsgálja az impregnálási folyamatban. Az UV-kezeléssel módosított felületi kémia hatásának elemzése lehetőséget ad annak megértésére, hogy a felületi oxidáció miként befolyásolja az impregnálógyanta nedvesítési és penetrációs viselkedését, valamint hogyan jelenik meg mindez a kialakuló szigetelőrendszer funkcionális tulajdonságaiban.

A kutatás harmadik célkitűzése a hőmérséklet hatásának vizsgálata a folyadék penetrációjára, különös tekintettel a hőmérséklet-gradiens által kiváltott áramlási jelenségekre. A cél annak feltárása, hogy a hőmérsékleti viszonyok tudatos alakításával miként módosítható a penetráció

kinetikája és dinamikája, és ez milyen lehetőségeket kínál az impregnálási folyamat idő- és energiaigényének csökkentésére.

A három kutatási irány egységes keretbe foglalva a geometria, a felületi állapot és a hőmérséklet szerepét vizsgálja az impregnálógyanta penetrációjában. A kutatás átfogó célja olyan megalapozott, ipari környezetben is alkalmazható elméleti megközelítések kidolgozása, amelyek hozzájárulhatnak a villamos motorok impregnálási technológiájának továbbfejlesztéséhez.

4. Elméleti munka

A következő alfejezetekben a penetráció kinetikáját modellezem izoterm körülmények között és hőmérséklet-gradiens hatására alatt.

4.1. Rézvezetők közé penetráló gyanta sebességének elméleti modellje

4.1.1. Alapvetések

Egy hajtú rézvezetőt téglalap alapú hasábnak tekintek, melynek hossza L (m), magassága H (m), vastagsága makroszkopikus, de annak pontos értéke lényegtelen. Két ilyen rézvezetőt teszünk egymás mellé párhuzamosan az $L \cdot H$ oldalukkal, egymástól d (m) távolságra. Ezeket a rézvezetőket hosszuk mentén vízszintesen egy papírlapra fektetem, és az egyik oldalról folyadékot engedek közéjük úgy, hogy a folyadék az egyik $d \cdot H$ oldal mentén lép be. A folyadék egy külső tartályból érkezik, amelyikben szintén H a folyadék magassága. Mivel a réstérfogat elhanyagolható a tartály térfogatához képest, ezért a tartályban lévő folyadékszint csökkenése a penetráció során elhanyagolható. A folyadéknak a résbe való belépésekor átmeneti áramlási folyamatok játszódnak le, melyek aztán elérik állandósult állapotukat. Itt csak az állandósult állapotot vizsgálom, az átmeneti állapotot elhanyagolom. Feltételezem, hogy a folyadék newtoni, ami laminárisan áramlik a résben. A résben lévő levegő kezdeti térfogata $L \cdot H \cdot d$. A résben a levegőt a folyadék fokozatosan lecseréli: t idő után a folyadékfront x utat tesz meg, ezért a térfogata $x \cdot H \cdot d$, míg a maradék levegő térfogata:

$$V_l = (L - x) \cdot H \cdot d \quad (6)$$

Newton szerint egy folyadék akkor kerül állandósult állapotba, ha a rá ható erők eredője zérus. Három erőt fogok vizsgálni, mind a három a folyadék belépési pontjától mutat vízszintesen az x (és az azzal párhuzamos L) irányok mentén a penetráció irányába, vagy fordítva. Ez a 3 erő a határfelületi kapilláris erő (F_c , N), a gravitációs erő (F_g , N) és a súrlódási erő (F_s , N). A folyadékot a résbe a kapilláris és a gravitációs erők összege fogja hajtani, míg a folyadékot a súrlódási erő fogja fékezni. Ezért állandósult állapotban a következő egyenlőség lesz érvényes:

$$F_c + F_g = F_s \quad (7)$$

A továbblépéshez vizsgáljuk külön-külön e három erőt.

4.1.2. A határfelületi kapilláris erő

A résbe belépő folyadékot négy felület határolja: oldalt két rézvezető (r), alul egy papír (p) és felül a levegő (l). Ezért a határfelületi kapilláris erő képlete:

$$F_c = 2 \cdot F_{c,r} + F_{c,p} + F_{c,l} \quad (8)$$

ahol $F_{c,r}$ (N) egy rézvezető mentén fellépő kapilláris erő, $F_{c,p}$ (N) a papír mentén fellépő kapilláris erő, $F_{c,l}$ (N) a levegő mentén fellépő kapilláris erő. Lássuk ezeket külön-külön. Ebből a célból írjuk fel a határfelületi erő általános képletét:

$$F_c = -\frac{dG_c}{dx} \quad (8a)$$

ahol G_c (J) a kérdéses felület teljes felületi Gibbs energiája, ami jellemzően a penetrációs út (x) függvénye és általános képlete:

$$G_c = A_c \cdot \sigma_c \quad (8b)$$

ahol A_c (m^2) a jellemző felület, σ_c (J/m^2) a jellemző határfelületi energia. A határfelületi energiák x -függését elhanyagoljuk és csak a határfelületek x -függése lesz figyelembe véve.

Egy rézvezető mentén fellépő határfelületi kapilláris erő

A rézvezetővel annak H magassága mentén találkozik a penetráló folyadék. Eredetileg a rézvezetővel L hosszon levegő érintkezett, de a penetráció eredményeként x hosszon a levegőt folyadék cserélte le. Ezért a rézvezető felülete egy nedves és egy száraz felületrészből áll. Ezek összege a (8b) egyenlet felhasználásával:

$$G_{c,r} = H \cdot x \cdot \sigma_{rl} + H \cdot (L - x) \cdot \sigma_{rg} \quad (9a)$$

ahol σ_{rl} (J/m^2) a rézvezető/folyadék határfelületi energia, σ_{rg} (J/m^2) a rézvezető felületi energiája. Vegyük figyelembe a Young egyenletet:

$$\sigma_{rg} - \sigma_{rl} = \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_r \quad (9b)$$

ahol σ_{lg} (J/m^2) a folyadék felületi feszültsége, θ_r (fok) a folyadék peremszöge a rézvezetőn, levegő atmoszférában. Behelyettesítve a (9b) egyenletet a (9a) egyenletbe:

$$G_{c,r} = H \cdot L \cdot \sigma_{rg} - H \cdot x \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_r \quad (9c)$$

Behelyettesítve a (9c) egyenletet a (8a) egyenletbe:

$$F_{c,r} = H \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_r \quad (9d)$$

Ez az erő a résbe fogja húzni a folyadékot, ha értéke pozitív, azaz ha $\cos\theta_h > 0$, azaz, ha $\theta_h < 90^\circ$, azaz, ha a folyadék jól nedvesíti a rézvezető felületét.

A papír mentén fellépő határfelületi kapilláris erő

A papírral a „d” résvastagság mentén találkozik a penetráló folyadék. Eredetileg a papírral L hosszban levegő érintkezett, de a penetráció során x hosszban a levegőt folyadék cserélte le. Ezért a papír felülete egy nedves és egy száraz felületrészből áll. Ezek összege a (8b) egyenlet felhasználásával:

$$G_{c,p} = d \cdot x \cdot \sigma_{pl} + d \cdot (L - x) \cdot \sigma_{pg} \quad (10a)$$

ahol σ_{pl} (J/m²) a papír/folyadék határfelületi energia, σ_{pg} (J/m²) a papír felületi energiája. Vegyük figyelembe a Young egyenletet:

$$\sigma_{pg} - \sigma_{pl} = \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_p \quad (10b)$$

ahol θ_p (fok) a folyadék peremszöge a papíron, levegő atmoszférában. Behelyettesítve a (10b) egyenletet a (10a) egyenletbe:

$$G_{c,p} = d \cdot L \cdot \sigma_{pg} - d \cdot x \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_p \quad (10c)$$

Behelyettesítve a (10c) egyenletet a (8a) egyenletbe:

$$F_{c,p} = d \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_p \quad (10d)$$

Ez az erő a résbe fogja húzni a folyadékot, ha értéke pozitív, azaz, ha $\cos\theta_p > 0$, azaz, ha $\theta_p < 90^\circ$, azaz, ha a folyadék jól nedvesíti a papír felületét.

A folyadék/levegő felület mentén fellépő határfelületi kapilláris erő

A felső folyadék/levegő határfelület keresztmetszete valamivel hosszabb lesz d értékénél a peremszög miatt, jelöljük ezt d* (m) jellel. Eredetileg nincs ilyen határfelület, mivel a levegő/levegő határfelület nem számít annak. Ezért ez az energiatag csak a „nedves” felületrészből áll. A (8b) egyenlet felhasználásával:

$$G_{c,l} = d^* \cdot x \cdot \sigma_{lg} \quad (11a)$$

Behelyettesítve az (11a) egyenletet a (8a) egyenletbe:

$$F_{c,l} = -d^* \cdot \sigma_{lg} \quad (11b)$$

Mivel ez az erő negatív, ki fogja tolni a résből a folyadékot, mivel a folyadék a levegőt egyáltalán nem „nedvesíti”.

A görbülettel módosított résméret geometriai modellje:

$$d^* = \frac{90-\theta_h}{180} \cdot \frac{d \cdot \pi}{\cos\theta_h} \quad (11c)$$

Az (11c) egyenlet egyik peremfeltétele: $\theta_h = 0^\circ$: $d^* = d \cdot \pi/2$, ami a d sugarú kör fél-kerülete, ami logikus. Az (11c) egyenlet másik peremfeltétele: $\theta_h = 90^\circ$: $d^* = (d \cdot \frac{\pi}{180}) \cdot (\frac{0}{0})$, ami határértékben $d^* = d$, ami szintén logikus. Behelyettesítve az (11c) egyenletet az (11b) egyenletbe:

$$F_{c,l} = -\frac{90-\theta_h}{180} \cdot \frac{d \cdot \pi}{\cos\theta_h} \cdot \sigma_{lg} \quad (11d)$$

Az összegzett határfelületi kapilláris erő

Behelyettesítve a (9d, 10d, 11d) egyenleteket a (8) egyenletbe:

$$F_c = \sigma_{lg} \cdot \left(2 \cdot H \cdot \cos\theta_h + d \cdot \cos\theta_p - \frac{90-\theta_h}{180} \cdot \frac{d \cdot \pi}{\cos\theta_h} \right) \quad (12a)$$

Az összegzett határfelületi kapilláris erő tehát arányos a folyadék felületi feszültségével. Ha a folyadék 90 foknál kisebb peremszöggel nedvesíti a hajtúket és a papírt, akkor (12) egyenlet zárójelének első két tagja a folyadékot a résbe fogja húzni, míg a zárójel harmadik tagja a folyadékot ki fogja tolni a résből. Ha $H \gg d$, akkor a (12a) egyenlet egyszerűsíthető:

$$F_c \cong 2 \cdot H \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h \quad (12b)$$

ahol $2H$ a penetráció irányára merőleges terület, ha határesetben $d = 0$.

4.1.3. A gravitációs erő

Kezdjük a folyadék gravitáció okozta, sztatikus nyomásával (p_g , Pa):

$$p_g = \rho \cdot g \cdot h \quad (13a)$$

ahol ρ (kg/m³) a folyadék sűrűsége, $g = 9,81$ m/s² a gravitációs gyorsulás, h (m) a folyadékszint magassága a Föld középpontja felé mérve az éppen kérdéses ponttól. Ha pl. a rés alját vizsgáljuk, akkor $h = H$, míg ha a rés tetejét, akkor $h = 0$ (ha a folyadék résbe való belógását elhanyagoljuk). Ugyan fent nem tettünk különbséget az alsó front és a felső front sebessége között, de a (13a) egyenlettel mégis különbséget tudunk majd tenni közöttük. A (13a) egyenlettel leírt nyomás a folyadék összes mikro-térfogatát határoló minden falra merőlegesen azonosan hat. Bennünket az az összetevő érdekel, ami a folyadékot a résbe nyomja Ennek az áramlási irányra merőleges keresztmetszete: $A = d \cdot H$. Ezért a gravitációs erő képlete:

$$F_g = p_g \cdot A = \rho \cdot g \cdot h \cdot d \cdot H \quad (13b)$$

Tehát két esetet különböztethetünk meg:

-a rés alján, ahol $h = H$:

$$F_{g,alul} = \rho \cdot g \cdot d \cdot H^2 \quad (13c)$$

-a rés tetején, ahol $h = 0$:

$$F_{g,felül} = 0 \quad (13d)$$

4.1.4. A súrlódási erő

Vizsgáljuk a két párhuzamos rézvezető-fal között fellépő súrlódási erőt newtoni folyadékra és lamináris áramlásra. Az egyik fal nedvesített felülete $x \cdot H$, a másik fal nedvesített felülete ugyanekkora, a két fal távolsága d . Súrlódási erő fellép ugyan a papíron is, de annak sokkal kisebb a felülete és azzal szemben nem álló fal van, hanem mozgó felület, ezért a papír hatását elhanyagoljuk és csak a két szembenálló rézvezető hatását vesszük figyelembe. Ez a feladat analóg azzal az áramlástani feladattal, amikor két párhuzamos fal közötti folyadék-áramlást vizsgálunk. Poirier és Geiger egyenletéből [124] a L hosszon nedvesített falon, $d=2 \cdot \delta$ (m) távolságú két fal között áramló folyadék átlagos sebessége (v , m/s):

$$v = \frac{\delta^2}{3 \cdot \mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (14a)$$

ahol μ (Pa.s) a folyadék viszkozitása, ΔP (Pa) a folyadékot a résbe kényszerítő nyomáskülönbség, ami nem más, mint a súrlódási erő, osztva a rés keresztmetszetével, ami $d \cdot H$. Figyelembe véve ezt, az $L = x$ egyenlőséget és a fenti $d=2 \cdot \delta$ képletet, a (14a) egyenlet átírható:

$$v = \frac{d}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{F_s}{H \cdot x} \quad (14b)$$

Innen a súrlódási erő:

$$F_s = 12 \cdot \mu \cdot v \cdot \frac{H \cdot x}{d} \quad (14c)$$

A (14c) egyenlet szerint az a súrlódási erő, ami v átlagsebességre kényszerít egy résben áramló folyadékot, arányos a folyadék viszkozitásával, az áramlási sebességgel, a súrlódó $H \cdot x$ felülettel és fordítottan arányos a résmérettel (d), azaz ahhoz, hogy egy folyadékot nem létező ($d = 0$) résbe préseljünk, végtelen erő kellene. A v sebesség a dx/dt hányadossal definiálható.

Behelyettesítve ezt a (14c) egyenletbe, a végleges egyenlet a súrlódási erőre:

$$F_s = 12 \cdot \mu \cdot \frac{H \cdot x}{d} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (14d)$$

4.1.5. A keresett egyenletek levezetése

Helyettesítsük az (7) egyenletbe a (12b, 13d, 14d) egyenleteket. Mivel a (13d) egyenlet a felső síkra vonatkozik, ezért az x-nek is ez az alsó index lett adva:

$$x_{felső} \cdot dx_{felső} = \frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h \cdot dt \quad (15a)$$

A (15a) egyenlet integrálásához a következő peremfeltételeket használom: a). $t = 0$ esetén: $x_{felső} = 0$ és b). $t = t$ esetén: $x_{felső} = x_{felső}$. Innen a (15a) egyenlet integrált alakja:

$$\frac{x_{felső}^2}{2} = \frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h \cdot t \quad (15b)$$

Innen a végleges egyenlet:

$$x_{felső}^2 = \frac{d}{3 \cdot \mu} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h \cdot t \quad (15c)$$

Látjuk, hogy a Washburn egyenlettől ez csak annyiban különbözik, hogy az $r/2$ helyett (ahol r a hengeres kapilláris sugara), vagy a $d^*/4$ helyett (ahol d^* a henger átmérője) mi a $d/3$ -at kaptuk, ahol d a két párhuzamos lemez távolsága.

Most ismételjük meg ugyanezt az analízist az alsó síkra, behelyettesítve az (7) egyenletbe a (12b, 13c, 14d) egyenleteket, ekkor az x-nek is ez az alsó index lett adva:

$$2 \cdot H \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h + \rho \cdot g \cdot d \cdot H^2 = 12 \cdot \mu \cdot \frac{H \cdot x_{alsó}}{d} \cdot \frac{dx_{alsó}}{dt} \quad (16a)$$

Átrendezés után:

$$x_{alsó} \cdot dx_{alsó} = \frac{2 \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h + \rho \cdot g \cdot d \cdot H}{12 \cdot \mu} \cdot d \cdot dt \quad (16b)$$

A (16b) egyenlet integrálásához a következő peremfeltételeket lettek használva: a). $t = 0$ esetén: $x_{alsó} = 0$ és b). $t = t$ esetén: $x_{alsó} = x_{alsó}$. Innen a (16b) egyenlet integrált alakja:

$$\frac{x_{alsó}^2}{2} = \frac{2 \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h + \rho \cdot g \cdot d \cdot H}{12 \cdot \mu} \cdot d \cdot t \quad (16c)$$

Innen a végleges egyenlet:

$$x_{alsó}^2 = \frac{2 \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\theta_h + \rho \cdot g \cdot d \cdot H}{6 \cdot \mu} \cdot d \cdot t \quad (16d)$$

Behelyettesítve ide a (15c) egyenletet:

$$x_{alsó}^2 = x_{felső}^2 + \frac{\rho \cdot g \cdot d^2 \cdot H}{6 \cdot \mu} \cdot t \quad (16e)$$

Mivel a (16e) egyenlet 2. tagjában minden mennyiség pozitív, innen azt látjuk, hogy adott t érték mellett $x_{alsó} > x_{felső}$, adódik. Innen a végső, a penetrációs kinetikát leíró egyenlet, amely a téglalap keresztmetszetű kapilláris teljes hosszának penetrációjához szükséges:

$$t_{teljes} = \frac{3 \cdot \mu}{d \cdot (\sigma_{lg} \cdot \cos \theta_h + \frac{d}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H)} \quad (17)$$

1A Tézis: Levezettem egy egyszerű, ipari gyakorlatban is alkalmazható penetrációs időmodellt téglalap keresztmetszetű kapillárisokra, amely figyelembe veszi a kapilláris alsó és felső határfelületén kialakuló eltérő nedvesítési viszonyokat, valamint a gravitáció hatását. A modell alapján a teljes penetrációs idő közvetlenül számítható a gyanta viszkozitásából, felületi feszültségéből, a peremszögéből és sűrűségéből, így alkalmas hajtű tekercselésű villamos motorok impregnálási folyamatának előzetes becslésére és technológiai tervezésére. A modell csak téglalap keresztmetszetre érvényes.

$$t_{teljes} = \frac{3 \cdot \mu}{d \cdot (\sigma_{lg} \cdot \cos \theta_h + \frac{d}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H)}$$

4.2. A penetrációs idő elméleti modellje hőmérséklet-gradiens esetén

A kapillárisban kialakuló áramlási viszonyokat megvizsgálva feltételezem, hogy a felső határfelület szerepe elhanyagolható, mivel geometriai aránya lényegesen kisebb az oldalfalakkhoz képest. Ennek megfelelően a továbbiakban a modellezés során az oldalfalak mentén fellépő határfelületi erőket veszem figyelembe.

A kapillárisban kialakult áramlást elemezve azt tapasztalom, hogy a klasszikus makroszkopikus peremfeltételek nem alkalmazhatók közvetlenül, mivel a folyadékfront a fal mentén halad előre. Ebből arra következtetek, hogy a szilárd/folyadék határfelület meghatározó szerepet játszik a penetráció dinamikájában. Ez azonban ellentmond annak a makroszkopikus áramlástanból ismert peremfeltételnek, miszerint a falon (vagyis a szilárd/folyadék határfelületen) az áramlási sebesség definíció szerint zérus. Ennek alapján a következőkben egy olyan modellt vezetek le, amely a hőmérséklet-gradiens hatását a határfelületi jelenségek explicit figyelembevételével írja le.

Vizsgáljunk egy téglalap keresztmetszetű, hosszú kapillárist, amely mentén hőmérséklet-gradiens alakul ki. A 4.1. fejezetben levezetett modellt kiterjesztéseként az állandósult állapotra a következő erőmérleg írható fel:

$$F_c + F_M = F_s \quad (18)$$

ahol az erők sorrendben: a kapilláris, a Marangoni és a súrlódási erők, mértékegységeik N. A gravitációs erőt itt elhanyagoltuk. A kapilláris erő egyszerűsített képlete, mint, ahogyan az a korábbiakban levezetésre került:

$$F_c = 2 \cdot H \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\Theta \quad (12b)$$

ahol H (m) a kapilláris függőleges falának magassága, míg d (m) a kapilláris szélessége. A vizsgált rendszerben H = 4 mm és d = 0,13 mm, így teljesül a H >> d feltétel, amely mellett a (12b) egyenlet érvényes. A súrlódási erő közelítő alakja, szintén a korábban felírt összefüggés alapján:

$$F_s = 12 \cdot \mu \cdot \frac{H}{d} \cdot x \cdot \frac{dx}{dt} \quad (14d)$$

ahol x (m) a folyadék helyzete a kapilláris mentén, x = 0-nak tekintve a tartályból a kapillárisba való átlépés helyét. A Marangoni erő képlete az oldalsó fal mentén [33,116,125]:

$$F_M = 2 \cdot H \cdot x \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (19)$$

ahol σ_{sl} (J/m²) a folyadék/szilárd határfelületi energia az oldalsó fal mentén, a fenti második bekezdésben írtakkal összhangban. Helyettesítsük be a (12b, 14d, 19) egyenleteket az (18) egyenletbe:

$$2 \cdot H \cdot \left(\sigma_{lg} \cdot \cos\Theta + x \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \right) = 12 \cdot \mu \cdot \frac{H}{d} \cdot x \cdot \frac{dx}{dt} \quad (20a)$$

Kisebbszámú átalakítások után:

$$\frac{6 \cdot \mu}{d} \cdot x \cdot \frac{dx}{dt} = x \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} + \sigma_{lg} \cdot \cos\Theta \quad (20b)$$

Tekintsünk minden fizikai mennyiséget, beleértve a $\frac{d\sigma_{sl}}{dT}$ és a $\frac{dT}{dx}$ értékeket is konstans értékűeknek, amik nem függenek x értékétől. Ekkor az (20b) egyenlet paraméteresen:

$$x \cdot \frac{dx}{dt} = a \cdot x + b \quad (20c)$$

$$a \equiv \frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (20d)$$

$$b \equiv \frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\Theta \quad (20e)$$

Az x és a t változók szétválasztása után (20c) differenciálegyenlet újraírható:

$$\frac{x}{a \cdot x + b} \cdot dx = dt \quad (20f)$$

Az (20f) egyenlet jobb oldalának integrálja: $t + C$, míg bal oldalának integrálja:

$$\frac{1}{a} \cdot \left(x - \frac{b}{a} \cdot \ln|a \cdot x + b| \right) \quad (20g)$$

Egyenlővé téve az (20g) egyenlet bal és jobb-oldali integráljait:

$$t + C = \frac{1}{a} \cdot \left(x - \frac{b}{a} \cdot \ln|a \cdot x + b| \right) \quad (20h)$$

Kezdeti feltétel: ha $t = 0$, akkor $x = 0$, innen:

$$C = -\frac{b}{a^2} \cdot \ln|b| \quad (20i)$$

Behelyettesítve az (20i) egyenletet az (20h) egyenletbe és kifejezve t -t:

$$t = \frac{1}{a^2} \cdot \left(a \cdot x + b \cdot \ln \left| \frac{b}{a \cdot x + b} \right| \right) \quad (20j)$$

Ha: $\frac{dT}{dx} = 0$, vagy $\frac{d\sigma_{sl}}{dT} = 0$, $a = 0$

$$x \frac{dx}{dt} = b \quad (21)$$

$$\frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot x = -\frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\Theta \quad (22)$$

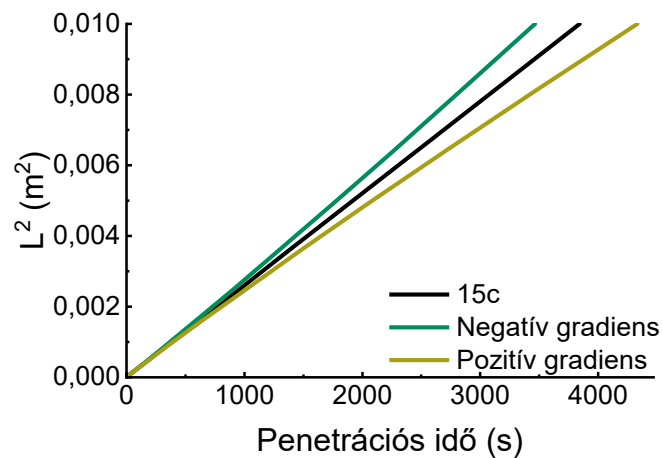
Egyszerűsítve az egyenletet, az alábbi kritikus hőmérséklet-gradienst kifejező összefüggés:

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{krit} = -\frac{\sigma_{lg} \cdot \cos\Theta}{x \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT}} \quad (23)$$

Ez az a gradiens, amelynél a kapilláris hajtóerőt a szilárd–folyadék határfelületi energia gradienséből származó ellenható tag éppen kompenzálja, ezért a penetráció pillanatnyi sebessége nullára csökken ($dx/dt = 0$). Az egyenlet $x > 0$ mellett érvényes.

4.2.1. Izoterm és hőmérséklet-gradiens melletti penetráció összehasonlítása

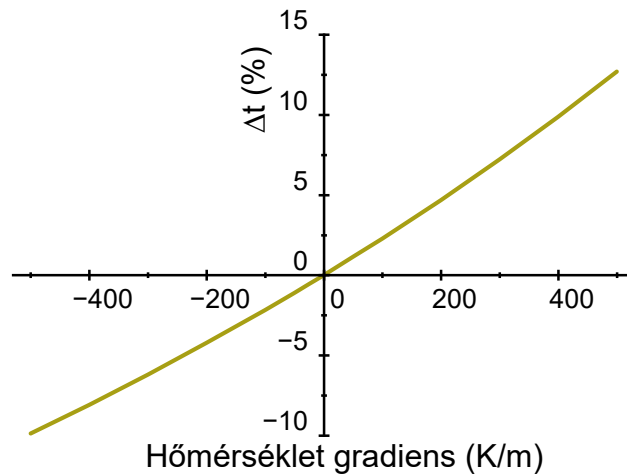
A téglalap keresztmetszetű kapilláris penetrációs kinetikája levezetésre került mind izoterm körülmények között, mind hőmérséklet-gradiens alatt. Végezetül hasonlítsuk össze az izoterm penetrációt (15c) egyenlet, valamint a hőmérséklet gradiens alattit (20j) egyenlet. Mind két esetben a gravitáció hatását figyelmen kívül hagyom. Az egyenletekhez használt paraméterek a következők: $x = 0,1$ m, $\mu = 0,4$ Pas, $d = 0,13$ mm, $\sigma_{lg} = 0,03$ N/m, $\cos\theta = 0,8$, $\frac{d\sigma_{sl}}{dT} = -8 \cdot 10^{-5}$ N/mK, $b = 1,30 \cdot 10^{-6}$ m²/s $\left| \frac{dT}{dx} \right| = 500$ K/m, $a = -2,17 \cdot 10^{-6}$ m/s. A pozitív és a negatív gradiens melletti függvények lettek ábrázolva, a 7. ábrán.



7. ábra Penetrációs idők elméleti összehasonlítása, gradiens mentes és gradiens melletti esetekben

Az ábrán látható, hogy a hőmérséklet-gradiens egyértelműen befolyásolja a penetráció kinetikáját: pozitív gradiens esetén a folyamat lassul, míg negatív gradiens esetén gyorsul. $G = 0$ esetben a modell visszaadja a gradiensmentes állapotot, ekkor a (20j) egyenlet a (15c) összefüggésre egyszerűsödik.

Bár az ábra alapján a hatás első közelítésben szimmetrikusnak tűnik, a részletesebb vizsgálat rámutat, hogy ez nem teljesen igaz. A 8. ábra a relatív penetrációs időváltozás (Δt , %) alakulását mutatja a hőmérséklet-gradiens ($\frac{dT}{dx}$, K/m) függvényében.



8. ábra A penetrációs időnövekmény $x = 0,1$ m-en számítva a hőmérséklet-gradiens függvényében, az 7. ábrán megadott adatokkal számolva (elméleti görbe, az 20j és 15c egyenletekből számolva)

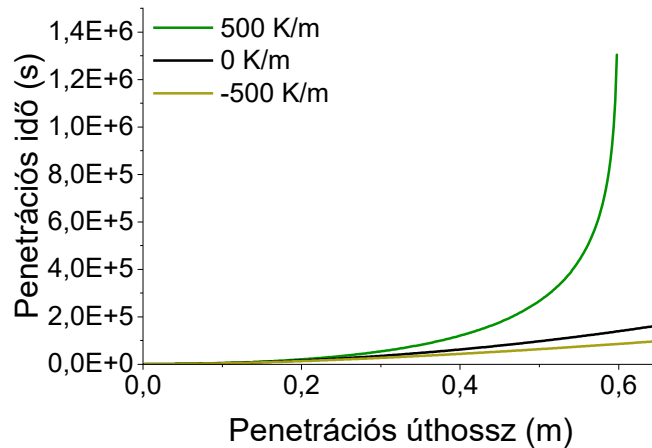
A pozitív hőmérséklet-gradiens hatása erőteljesebb, vagyis az általa okozott lassulás nagyobb mértékű, mint a negatív gradiens által okozott gyorsulás azonos nagyságú gradiens esetén. Ez az aszimmetria arra utal, hogy a hőmérséklet-gradiens hatása nem írható le pusztán lineáris közelítéssel, és a folyamatban nemlineáris határfelületi jelenségek is szerepet játszanak.

4.2.2. A kritikus penetrációs úthossz meghatározása

Végül egy speciális határeset is azonosítható, amikor az (20c) egyenlet jobb oldala zérussá válik, és a kapilláris hajtóerő megszűnik. Ez két esetben fordulhat elő: ha b értéke (20e) szerint pozitív, de a értéke (20d) szerint negatív, vagy fordítva. Számunkra az előző eset érdekes, amikor a folyadék nedvesíti a falat, a hőmérsékletgradiens pozitív, de a határfelületi energia hőmérsékleti koefficiense negatív. Ekkor az (20c) egyenlet jobb oldala egy speciális x_{kr} érték mellett zérus lesz, aminek definíciója:

$$x_{kr} = -\frac{b}{a} \quad (26)$$

Behelyettesítve az 7. ábra leírásából a $b = 1,30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ és 500 K/m T-gradiens mellett $a = -2,17 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ értékeket: $x_{kr} = 0.599 \text{ m}$, azaz ennél a penetrációs hosszánál megszűnik (nullára csökken) a penetráció hajtóereje és ezért a penetrációs idő a végtelenbe tart. Ezt az esetet mutatom be a 9. ábrán. Az ábráról kiderül, hogy $x = 0,6 \text{ m}$ környékén a $+500 \text{ K/m}$ -hez tartozó görbe a végtelenbe száll. Véleményem szerint ez magyarázza a 8. ábra aszimmetriáját is, hiszen negatív T-gradiens esetén nincs ilyen jelenség.



9. ábra Speciális esetet, ahol pozitív hőmérséklet-gradiens mellett létezik egy olyan x_{kr} penetrációs hossz, amelyhez közelítve a 500 K/m esetben a penetrációs idő a végtelenbe tart, ami a kapilláris hajtóerő megszűnésére utal. (elméleti görbék, a 20j és 15c egyenletekből számolva)

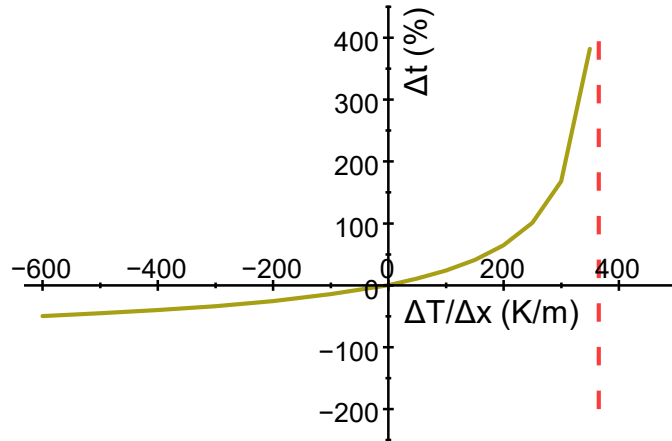
4.2.3. A kritikus hőmérséklet-gradiens meghatározása

Az (20a) egyenlet alapján a penetráció hajtóereje megszűnik, ha teljesül a következő feltétel: $\sigma_{lg} \cos \Theta = -x \cdot (d\sigma_{sl}/dT) \cdot (dT/dx)$. Ebből kifejezhető a kritikus hőmérséklet-gradiens, behelyettesítve a (23) egyenletbe:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{cr} = \frac{\sigma_{lg} \cdot \cos\Theta}{-0,1 \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT}}$$

A (elméleti görbe, a 20j és 15c egyenletekből számolva)

adatait behelyettesítve $(dT/dx)_{cr} \approx 365$ K/m adódik. Ez azt jelenti, hogy a modell érvényessége ehhez a határértékhez kötött, és nagyobb gradiens esetén a leírás már nem alkalmazható. A kritikus értéket az 10. ábrán függőleges szaggatott vonal jelöli. A kritikus hőmérséklet-gradiens mellett a penetrációs idő tart a végtelenbe, hiszen a határfelületi erő és a határfelületi energia gradiens által indukált Marangoni erő azonos nagyságrendű, azonban ellentétes előjelűek. Ezáltal kioltják egymást.



10. ábra Kritikus hőmérséklet-gradiens, amelynél a hajtóerő nullához tart, így a penetrációs idő tart a végtelenbe, a kritikus-gradiens értékét piros függőleges szaggatott vonal jelzi. Az (elméleti görbe, a 20j és 15c egyenletekből számolva)

adatait felhasználva, (elméleti görbe, a 20j és 15c egyenletekből számolva)

4.2.4. Modell paraméterek meghatározása

A 4.2. fejezetben bemutatott, elméleti összefüggés a következő két komplex paraméter függvénye:

$$a \equiv \frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (20d)$$

$$b \equiv \frac{d}{6 \cdot \mu} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos\Theta \quad (20e)$$

ahol $d = 0,13$ mm (= konstans), μ (Pas) a gyanta dinamikai viszkozitása, $\frac{d\sigma_{sl}}{dT}$ (J/m²K) a szilárd/folyadék határfelületi energia hőmérsékleti koefficiense, σ_{lg} (J/m²) a gyanta felületi feszültsége, Θ (fok) a gyanta peremszöge az oldalfalon levegő környezetében. A Young egyenletből:

$$\sigma_{sl} = \sigma_{sg} - \sigma_{lg} \cdot \cos\Theta \quad (24)$$

A (25) egyenlet deriváltja a hőmérséklet szerint:

$$\frac{d\sigma_{sl}}{dT} = \frac{d\sigma_{sg}}{dT} - \frac{d\sigma_{lg}}{dT} \cdot \cos\Theta - \sigma_{lg} \cdot \frac{d\cos\Theta}{dT} \quad (25)$$

A fizikai mennyiségeket az átlagos 80 °C hőmérsékleten a (elméleti görbe, a 20j és 15c egyenletekből számolva)

foglalja össze. A modell egyetlen nem mért paramétere a szilárd fal felületi energiájának hőmérsékleti koefficiense ($d\sigma_{sg}/dT$), amelynek közvetlen meghatározása gyakorlatilag nem megvalósítható. Ennek becsléséhez irodalmi adatokat használtam [126,127]: a folyékony vas felületi energiája az olvadáspont közelében $\sim 2 \pm 0,1$ J/m², míg a szilárd fémek felületi energiája alacsony hőmérsékleten jellemzően $\sim 50\%$ -kal nagyobb. Ebből kiindulva a szilárd Fe felületi energiája 0 K közelében $\sim 3 \pm 0,3$ J/m²-re becsülhető. A hőmérsékleti koefficiens nagyságrendje a kritikus hőmérséklettel való osztással, valamint az alacsony hőmérsékletre jellemző meredekebb csökkenés figyelembevételével adható meg, amely alapján $(d\sigma_{sg}/dT) \approx -(3,2 \dots 9,2) \cdot 10^{-4}$ J/m²K értéket vettem figyelembe a további számítások során.

1. táblázat A (20d, 20e, 22, 23) egyenletekben szereplő tulajdonságok 80 C-on (EP-201 gyantára)

Mennyiség	Mértékegység	érték	forrás
d	m	$1,3 \cdot 10^{-4}$	mérés
μ	Pas	0,0328	mérés
σ_{lg}	J/m ²	0,0325	mérés
$\cos\theta$	---	0,989	mérés
$\frac{d\sigma_{sg}}{dT}$	J/m ² K	$(-3,2 \dots -9,2) \cdot 10^{-4}$	becsült
$\frac{d\sigma_{lg}}{dT}$	J/m ² K	$-8,02 \cdot 10^{-5}$	mérés
$\frac{d\cos\theta}{dT}$	1/K	$1,21 \cdot 10^{-3}$	mérés
$\frac{d\sigma_{sl}}{dT}$	J/m ² K	$-(2,8 \dots 8,8) \cdot 10^{-4}$	(28)
a/(dT/dx)	m ² /Ks	$-(1,9 \dots 5,8) \cdot 10^{-7}$	(20d)
b	m ² /s	$2,12 \cdot 10^{-5}$	(20e)
k	s/m ²	$2,35 \cdot 10^4$	(15c)

1B Tézis: Levezettem a téglalap keresztmetszetű kapillárisra módosított Washburn-modell hőmérséklet-gradiens hatását is figyelembe vevő kiterjesztését, amely nem izoterm viszonyok között írja le a kapilláris penetrációt, és speciális esetként visszaadja a gradiensmentes állapotot. A modell alapján kimutattam, hogy pozitív hőmérséklet-gradiens és nedvesítő

rendszer esetén létezik egy kritikus penetrációs úthossz ($x_{kr} = -b/a$), amelynél a határfelületi hajtóerő a nullához tart, ezért a penetrációs idő a végtelenbe tart. Kimutattam továbbá, hogy adott penetrációs hossz esetén a hőmérséklet-gradiensnek is létezik egy kritikus értéke, amelynél ugyanez a feltétel teljesül: a hajtóerő megszűnik, és a modell végtelen penetrációs időt jelez előre. Ez alapján a kritikus úthossz és a kritikus gradiens egyaránt a levezetett modell matematikai érvényességi határát jelöli ki.

$$t = \frac{1}{a^2} \cdot \left(a \cdot x + b \cdot \ln \left| \frac{b}{a \cdot x + b} \right| \right)$$

$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{krit} = - \frac{\sigma_{lg} \cdot \cos\Theta}{x \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT}}$$

1C Tézis: Kimutattam, hogy a hőmérséklet-gradiens előjele meghatározó módon befolyásolja a kapilláris penetráció kinetikáját: pozitív gradiens esetén a folyamat lassul, míg negatív gradiens esetén gyorsul. Kimutattam továbbá, hogy a hatás nem szimmetrikus, azaz azonos nagyságú gradiens esetén a pozitív gradiens által okozott penetrációs kinetika lassulás nagyobb mértékű, mint a negatív gradiens által okozott gyorsulás.

5. Kísérletek módszerek és anyagok

Ebben a fejezetben ismertetem a kísérletek során, az általam alkalmazott berendezéseket, valamint a felhasznált anyagokat és módszereket. Bemutatásra kerül két, azonos működési elven alapuló penetrációs készülék: az egyik izoterm vizsgálatokhoz és az UV-kezelés behatásának elemzésére, a másik hőmérséklet-gradiens behatásának tanulmányozására került kialakításra. Továbbá részletezem a mérési körülményeket és az alkalmazott kiértékelési eljárásokat, amelyek megalapozzák az eredmények értelmezését.

A vizsgálatok három kísérletsorozatra tagolhatók:

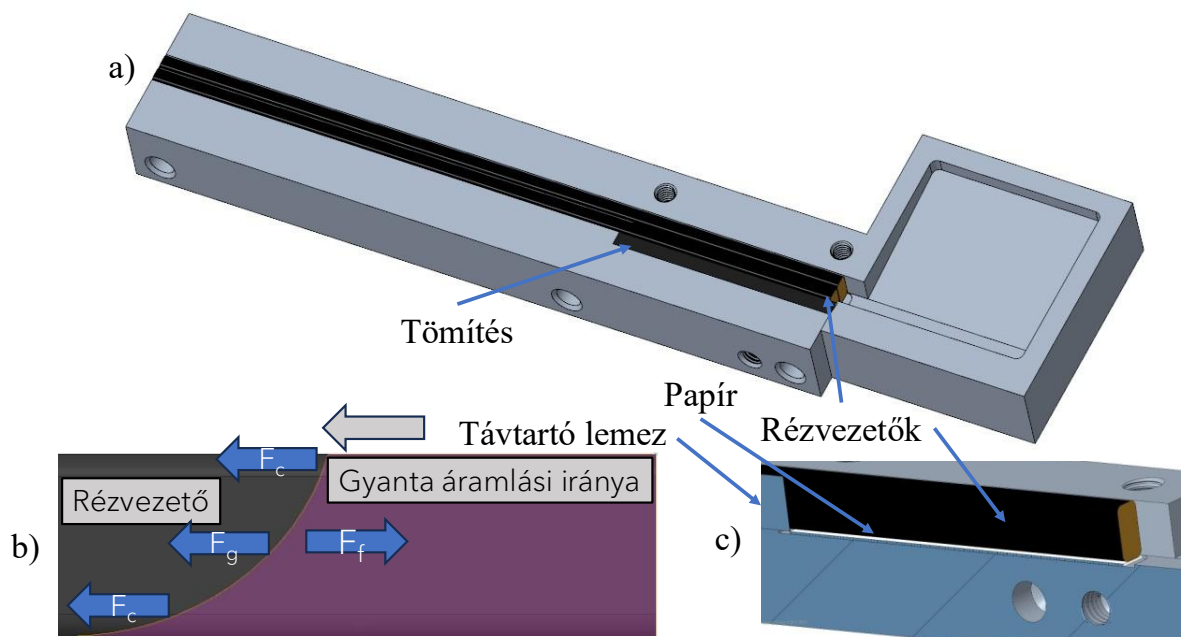
1. izoterm penetrációs mérések a téglalap keresztmetszetre kiterjesztett Washburn-modell validálására,
2. UV-kezelés hatásának vizsgálata a penetrációs viselkedésre, valamint
3. Hőmérséklet-gradiens behatásának elemzése a penetrációs folyamat kinetikájára, továbbá a nem-izoterm körülményekre kiterjesztett, módosított Washburn modell validálására.

5.1. Penetrációs készülékek tervezése

Ezen alfejezetben mutatom be a penetrációs kísérletekhez fejlesztett mérőkészülékek kialakításait és az azokon végrehajtott mérések metódusát.

5.1.1. Penetrációs készülék állandó hőmérsékletű vizsgálatokhoz

Az impregnáló gyanta tekercselésekbe történő penetrációjának vizsgálatára egy saját fejlesztésű mérőberendezést alakítottam ki, amelyet az 11. ábra szemléltet. A készülék alapját egy téglalap keresztmetszetű kapilláris képzi, amelyet két párhuzamosan elhelyezett rézvezető, egy távtartó lemez és egy horonyszigetelő papír határoz meg. A berendezés teste marással készült alumíniumból, amelyben egy kis térfogatú (2 mL) tartály került kialakításra a gyanta befogadására. A tartályhoz csatlakozó csatornán keresztül a folyadék a kapilláris kezdetéhez áramlik, amely a penetráció kezdőidőpontját jelenti.



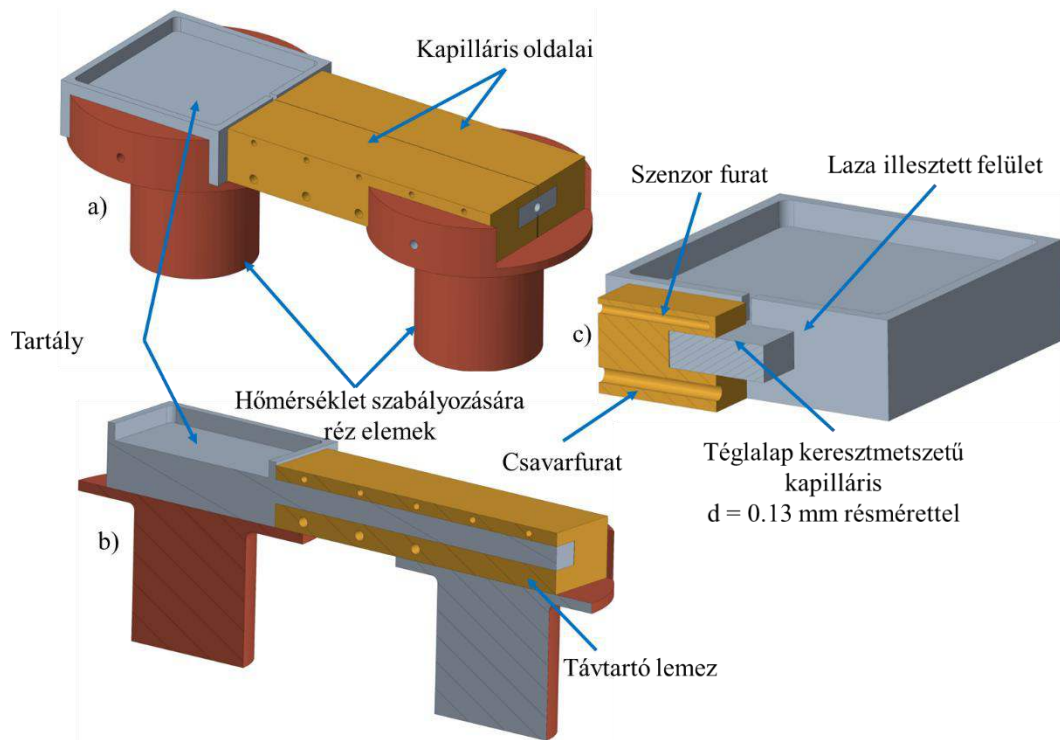
11. ábra A penetrációs mérőberendezés. a) A mérőberendezés kialakítása b) A gyanta áramlásának és a kísérlet során ható erők sematikus ábrázolása, ahol F_c a határfelületi kapilláris erő, F_g a gravitációs erő, míg F_f a súrlódási erő c) A kísérleti elrendezés

A vizsgált penetrációs úthosszak 30 mm és 60 mm voltak. A folyadékfront pontos követhetősége érdekében a kapillárison lézeres jelöléssel skálát alakítottam ki, amelynek elhelyezése a Lucas–Washburn-összefüggés (5) alapján történt. A jelölések úgy kerültek meghatározásra, hogy az egymást követő szakaszokhoz tartozó penetrációs idők közel azonosak legyenek: 30 mm-es esetben $\sim 100 \text{ mm}^2$ -es, míg 60 mm-es esetben $\sim 360 \text{ mm}^2$ -es lépésközzel. Ennek megfelelően a 30 mm-es kapillárison a jelölések a következő pozíciókban helyezkedtek el: 10,0; 14,1; 17,3; 20,0; 22,4; 24,5; 26,5; 28,3 és 30,0 mm, míg a 60 mm-es kapillárison: 0; 19,0; 26,8; 30,0; 32,9; 37,9; 42,4; 46,5; 50,2; 53,7; 56,9 és 60,0 mm.

Az első mérési pontokat ($x = 10 \text{ mm}$, illetve $x = 19 \text{ mm}$) a kapilláris belépési szakaszán fellépő tranziens jelenségek elkerülése érdekében választottam meg. A maximális, kezdetben 30 mm-es penetrációs hosszt az $5\times$ nagyítású fénymikroszkópos megfigyelhetőség korlátozta, amelyet később módosításokkal 60 mm-re növeltem. Ezek a hosszak jól közelítik az ipari gyakorlatban jellemző, 100–200 mm-es penetrációs tartományt. A gyanta penetrációját ezen a skálán követtem nyomon, és a penetrációs időket a kijelölt pozíciók eléréséhez tartozó időpontok alapján határoztam meg. Az UV-kezelés hatásának vizsgálata szintén ezen a mérőrendszeren történt.

5.1.2. Penetrációs készülék hőmérséklet-gradiens hatásának tanulmányozására

A hőmérséklet-gradiens hatásának tanulmányozására szintén egy dedikált kísérleti mérőberendezést terveztem, amely a 12. ábrán látható. A gyártási rajzok a mellékletben találhatóak. A berendezés szintén egy téglalap keresztmetszetű kapillárisból áll, amelyet két párhuzamos, köszörült acél elem határoz meg, $L = 100$ mm hosszúsággal. A lemezek közötti távolságot egy távtartó biztosítja, amely, így $d = 0,13$ mm résméretet határoz meg. A kapilláris alsó felületét, tömítési céllal egy szigetelő papírréteg képezte. A felső határfelület kialakítása a kísérleti konfigurációtól függő: nyitott esetben a folyadék–levegő határfelület szabadon érintkezett a környezettel, míg zárt konfigurációban a kapilláris felső felülete kapton fóliával zártam le.



12. ábra A hőmérséklet-gradiens hatásának tanulmányozására készült kísérleti berendezés sematikus ábrája a) A penetrációs készülék áttekintő képe, amelyen látható a folyadéktartály, a téglalap keresztmetszetű kapillárist kialakító köszörült acél elemek, valamint a rézből készült hőmérséklet-szabályozó elemek b) A berendezés metszeti nézete, amely szemlélteti a távtartó által meghatározott kapillárisrést, valamint a hőmérséklet-szabályozó elemek elrendezését c) A kapilláris részletrajza, amely bemutatja a téglalap keresztmetszetű kapilláris kialakítását, a távtartó lemez helyét és a kapilláris oldalainak tájolását.

A berendezés egy 12 mL térfogatú gyantatartályt tartalmaz, amely a kapilláris bemenetéhez csatlakozik, és amelybe a vizsgált gyantát fecskendő segítségével adagolom be.

A mérés kezdőidőpontját szintén a folyadékfront kapilláris bemenetéhez történő érkezésekor definiáltam. A kísérlet a gyanta teljes, 100 mm-es penetrációs úthosszának elérésekor ért véget.

A penetrációs úthossz alakulása a teljes kapilláris hossza mentén követve volt. A mérési pontok a bemenettől számított 32, 45, 55, 63, 71, 77, 84, 89, 95 és 100 mm távolságoknál kerültek kijelölésre. Ezen pozíciók kiválasztása szintén a Lucas–Washburn-összefüggés alapján történt, annak érdekében, hogy az egymást követő mérésekhez tartozó időközök közel azonosak legyenek.

A kapilláris menti hőmérséklet mérése K-típusú termoelemek alkalmazásával történt. A szenzorok a kapilláris kezdetétől számítva 10, 30, 50, 70 és 90 mm távolságokban kerültek elhelyezésre. Minden mérési pozícióban két termoelem lett beépítve, egymással szemben, a két köszörült acéltestbe integrálva, a kapilláris keresztmetszetében fellépő hőmérsékleteloszlás pontos meghatározása érdekében.

A hőmérséklet szabályozására rézből készült elemeket alkalmaztam, amelyek lokális hőelvonást tettek lehetővé a kapilláris kezdetén vagy végén, a mérési konfigurációtól függően. A fűtés úgy került megvalósításra, hogy a penetrációs készülék egyik végén a kapilláris bemeneti vagy kilépési oldala közvetlenül a fűtőlapra lett helyezve, míg a másik vége szabadon, a környezeti levegőben volt. A szabad végre egy további réz elem került rögzítésre a hőelvonás fokozása érdekében, amely hozzájárult a hűtés hatékonyságának javításához. Emellett a kapilláris szabad vége a környezeti levegővel érintkezett, ami a hőmérséklet kiegyenlítődését eredményezte a kísérlet időtartama alatt. Ennek következtében a kialakuló hőmérsékletmező nem tekinthető ideálisnak, hanem térben és időben változó eloszlást mutatott a kapilláris mentén.

5.1.3. A hőmérsékletmező rekonstrukciója és a hőmérséklet-gradiens alatti mérések kiértékelési módszere

Mobilitási paraméter meghatározása

A penetráció dinamikájának kiértékelése a Lucas–Washburn-összefüggés alapján történt, amely a penetrációs hossz L és az idő t közötti kapcsolatot írja le:

$$L = k \cdot \sqrt{t} \quad (27)$$

ahol k ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1/2}$) a kapilláris penetráció sebességét jellemző mobilitási paraméter, amely hőmérsékletfüggő. Minden izoterm kísérlet esetén a k értéke a mért penetrációs adatokból

került meghatározásra. A k értéke meghatározható az (21) egyenletből. Az eredmény a teljes penetrációs folyamat időbeli lefutásának elemzéséből adódik.

A penetrációs időt a penetrációs hossz négyzetének függvényében ábrázoltam és lineáris kapcsolat adódott, összhangban az (21) egyenlettel. Az így kapott egyenes meredeksége $1/k^2$ -nek felel meg, amely lehetővé teszi a mobilitási paraméter pontos meghatározását. A k értékek minden vizsgált hőmérsékleten meghatároztam, majd ezek alapján felírtam a mobilitási paraméter hőmérsékletfüggését, $k(T)$.

A kapott $k(T)$ függvény ezt követően a nem izoterm körülmények közötti penetráció vizsgálatánál, az izoterm eseteket alapul véve, referenciaként használtam fel. A referencia és a kísérletileg mért penetrációs idők közötti eltérések így a hőmérséklet-gradiens behatásának tulajdoníthatók.

Hőmérsékletmező és gradiens meghatározása

A kapilláris menti hőmérséklet-eloszlás meghatározása több, diszkrét pozícióban elhelyezett szenzorokkal végzett mérések alapján történt. A szenzorok a kapilláris mentén rögzített távolságokban helyezkedtek el, így minden mérési pontban időfüggő hőmérsékletadatok álltak rendelkezésre. A mérésekből minden egyes pozícióra meghatároztam a hőmérséklet időbeli alakulását. Folytonos hőmérsékletmező előállítására érdekében az egyes pozíciókhoz tartozó hőmérséklet–idő adatokat másodfokú polinommal közelítem, amely az alábbi alakban lett felírva:

$$T(L, t) = a(L) + b(L) \cdot t + c(L) \cdot t^2 \quad (28)$$

ahol az a , b és c együtthatók minden mérési helyen a rögzített adatok illesztésével kerültek meghatározásra. Ezt követően az együtthatók térbeli változása lineáris, illetve másodfokú illesztéssel került leírásra a kapilláris hossza mentén, így lehetővé vált egy folytonos $T = f(L, t)$ hőmérsékletmező felírása a teljes kapillárisra.

A kialakított hőmérsékletmező alapján a hőmérséklet-gradiens meghatározása a hőmérséklet hely szerinti parciális deriváltjával, $\partial T / \partial L$ történt. A gradiens minden pozícióban és több időpillanatban kiszámításra került. Az így kapott lokális gradiensértékek $G = f(L, t)$ formában álltak rendelkezésre, amelyekből a rendszerre jellemző effektív hőmérséklet-gradiens átlagolással került meghatározásra. A hőmérsékleti viszonyok tranziens jellege miatt a gradiens térben és időben is változik, ezért egy effektív gradiens került definiálásra a kapilláris mentén és a mérési időtartam alatt vett átlagként.

A penetrációs idők numerikus számítása

A hőmérsékletmező $T = f(L, t)$ behelyettesítésével a hőmérsékletfüggő mobilitási paraméterbe a penetrációt leíró egyenlet az alábbi módon írható fel:

$$L = k[T(L, t)] \cdot \sqrt{t} \quad (29)$$

Az így kapott összefüggés bonyolultsága miatt analitikus megoldás nem adható. Ezért a különböző penetrációs hosszokhoz tartozó időértékeket numerikus úton, iteratív eljárással számoltam ki, azaz azon időpontok keresésével, amelyeknél az egyenlet bal és jobb oldalának különbsége közel zérus.

Az így meghatározott referencia penetrációs idők az izoterm referencia-kísérletek alapján felírt $k(T)$ függvény felhasználásával kerültek számításra, majd összehasonlítottam őket a kísérletileg mért penetrációs időkkel.

5.2. Kísérletekhez felhasznált anyagok

A kísérletek során két, ipari alkalmazásban széles körben használt impregnáló gyantákat használtam: a Voltatex® 4200 (V-4200) poliészter bázisú, valamint az Elantas® EP 201 (EP-201) epoxi bázisú gyanta. Mindkét anyag elterjedt az autóiipari impregnálási eljárásokban, és Newtoni folyadékként viselkedik.

Az izoterm penetrációs kísérletek során, a téglalap keresztmetszetre kiterjesztett Washburn-modell validálásához mindkét gyanta (V-4200 és EP-201) alkalmazásra került. Az UV-kezelés, valamint a hőmérséklet-gradiens hatásának vizsgálatára kizárólag az EP-201 gyantát használtam.

A gyanták termofizikai tulajdonságait, jelen disszertációban meghatároztam, így azok hőmérsékletfüggése ismert. A viszkozitás és a felületi feszültség jelentős hőmérsékletfüggése alkalmassá teszi a rendszert termokapilláris (Marangoni-) jelenségek vizsgálatára.

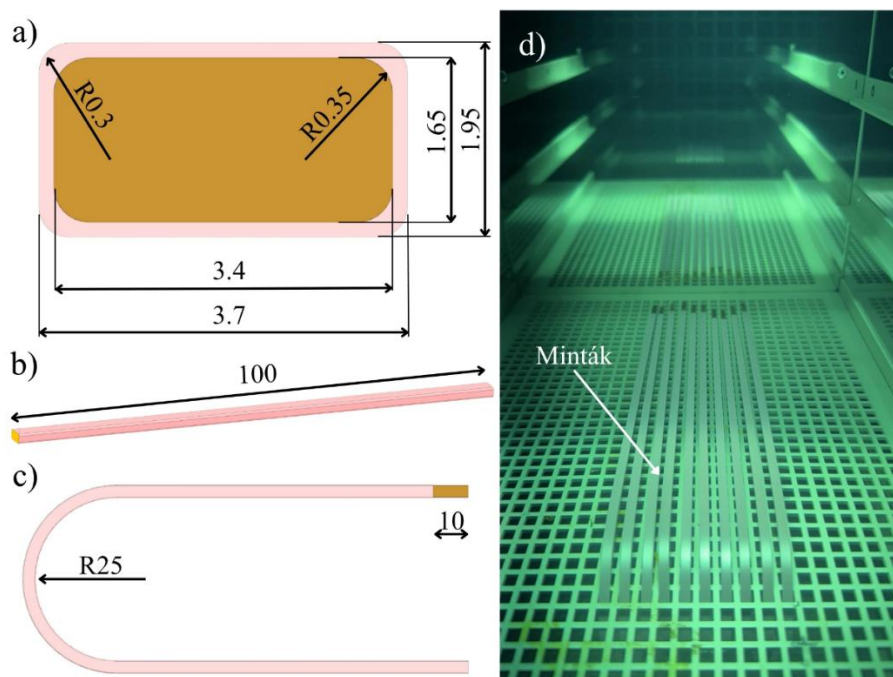
Szubsztrátként autóiipari elektromotorokban alkalmazott, téglalap keresztmetszetű rézvezetőket használtam. A csupasz vezető névleges mérete $1,65 \text{ mm} \times 3,40 \text{ mm}$, amelyet $0,15 \pm 0,02 \text{ mm}$ vastagságú polimer szigetelőréteg borít. Az izoterm (Washburn-alapú) kísérletek során poliimid (PAI), míg az UV-kezelés hatásának vizsgálatokor poliéter-éter-keton (PEEK) bevonat került alkalmazásra. A hőmérséklet-gradiens hatását acél felületen, a penetrációs készülékben kialakított kapilláris geometriában vizsgáltam.

A gyanta–szilárd fázis kölcsönhatások izolált elemzése érdekében, a penetrációs vizsgálatok során, egyenes rézvezetők, $L = 100$ mm hosszúságú laboratóriumi minták alkalmaztam, elektromos motorba épített geometria komplett tekerceslés helyett.

5.2.1. A PEEK bevonatos rézvezetők felületének UV-kezelése

Az UV-kezelés LOCTITE UVALOC 1000 típusú, higany lámpával ellátott UV-kamrában hajtottam végre (Henkel Corporation, Rocky Hill, CT, USA), amelynek jellemző hullámhossza 365 nm. A berendezés négy különböző besugárzási intenzitás beállítását teszi lehetővé (35, 50, 70 és 110 mW/cm^2). A PEEK bevonatos rézvezetők jellemző méreteit és azok UV kezelését a 13. ábra mutatja be.

A penetrációs kísérletekre használt mintákat 110 mW/cm^2 intenzitáson 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 és 300 másodperces besugárzási időkkel kezeltem. Referenciaként kezeletlen mintákat is vizsgáltam. A megfelelő fajlagos besugárzási energiák rendre 0; 1,1; 2,2; 3,3; 6,6; 13,2; 19,8; 26,4 és 33 J/cm^2 értékeknek feleltek meg. Minden hőmérsékleti vizsgálati ponthoz három mintasorozat készült, egy-egy UV-kezelési állapotra hat mintával.



13. ábra Minták előkészítése és UV-kezelési elrendezés: a) PEEK bevonatú rézvezető keresztmetszete és méretei (mm) b) 100 mm hosszú egyenes minták penetrációs vizsgálatokhoz c) 500 mm hosszú, U-alakra hajlított minták villamos átütési vizsgálatokhoz d) UV-kezelés az UV-kabinban

A villamos átütési szilárdság vizsgálatához 500 mm hosszúságú rézvezető mintákat készítettem GROB hajlítógép segítségével (GROB-WERKE GmbH & Co. KG, Mindelheim,

Németország). A mintákat 25 mm hajlítási sugarú U-alakra formáltam, a mintaelőkészítés az IEC 60851-5:2008 + AMD1:2011 + AMD2:2019 [128] szabvány előírásai szerint történt. Az UV-kezelés során a minta teljes külső felülete besugárzásra került, beleértve az egyenes szakaszokat és a külső ívet is, míg a belső hajlítási sugár a geometriai árnyékolás miatt nem volt besugározható.

A minták egy részét azonos besugárzási idők mellett alacsonyabb besugárzási intenzitásokon is kezeltem, azonos fajlagos besugárzási energia elérése mellett. A 110 mW/cm² fajlagos besugárzási intenzitáson alkalmazott expozíciós idők a penetrációs kísérletek során használt időlépésekkel megegyező módon választottam meg, biztosítva a közvetlen összehasonlíthatóságot. Alacsonyabb besugárzási intenzitások esetén az expozíciós idők ennek megfelelően módosításra kerültek azonos fajlagos besugárzási energia elérése céljából:

- 70 mW/cm²: 94, 189 és 283 s (6,6; 13,2; 19,8 J/cm²),
- 50 mW/cm²: 132, 264 és 396 s (6,6; 13,2; 19,8 J/cm²)

Az átütési szilárdság vizsgálatokhoz minden egyes UV-kezelési állapotra öt mintát készítettem. A megfelelő elektromos kontaktus biztosítása érdekében a minták egyik végén mintegy 10 mm hosszan eltávolítottam a szigetelőréteget.

5.3. Anyagvizsgálatok

Az anyagvizsgálatok három fő területet fednek le, amelyek a rendszer különböző fizikai szintjeinek jellemzését teszik lehetővé. Ennek megfelelően a gyanták termofizikai tulajdonságainak meghatározása, a felületek kémiai és szerkezeti vizsgálata, valamint a villamos tulajdonságok értékelését végeztem el.

5.3.1. Termofizikai tulajdonságok

A vizsgált gyanták és felületek jellemzésére különböző anyagvizsgálati módszereket alkalmaztam. A mérések célja a penetrációs folyamatot befolyásoló termofizikai és felületi tulajdonságok meghatározása volt. Ennek érdekében a viszkozitás, a sűrűség, a felületi feszültség, valamint a felületek kémiai összetételének és szerkezetének vizsgálatát hajtottam végre. A termofizikai tulajdonságok meghatározására irányuló mérések 25 °C, 40 °C, 60 °C és 80 °C hőmérsékleteken kerültek elvégzésre.

Peremszög mérések

A peremszög méréseket a Miskolci Egyetemen található, peremszögmérő berendezéssel hajtottam végre, statikus cseppmódszerrel. A vizsgálatok során 5db 3 μL térfogatú gyantacseppek kerültek felhelyezésre PAI bevonatú rézvezető felületére. Minden mérés előtt öt cseppet helyeztem el a felületen. A mérések megkezdése előtt 10–100 s várakozási idő lett alkalmazva annak érdekében, hogy a nagy viszkozitású gyanta cseppek elérjék mechanikai egyensúlyi állapotukat. Ezen felül még a hőmérséklet-gradiens hatását vizsgáló penetrációs készülék kapillárisának acél falán, valamint a kapilláris tetejének a lezárásához használt kapton fólián történtek vizsgálatok, a korábban leírtak szerint.

Dinamikai viszkozitás

A gyanták dinamikai viszkozitásának meghatározását IKA ROTAVISC Io-vi típusú rotációs viszkoziméterrel tanulmányoztam, a Miskolci Egyetem kémiai intézetének, vegyipari Technológiai Intézeti laboratóriumában hajtottam végre. A mérések során SP1 típusú ($\text{Ø}18,8$ mm) orsót alkalmaztam. A poliészter alapú gyanta esetében 1 rpm, míg az epoxi alapú gyanta esetében 2 rpm fordulatszám került beállításra. Mindkét gyanta esetében hat egymástól független mérés került elvégzésre, majd az eredmények átlagolásra kerültek.

Sűrűség

A gyanták sűrűségének meghatározása Anton Paar DMA 4500 M típusú sűrűségmérő készülékkel történt.

Felületi feszültség

A gyanták felületi feszültségének meghatározása függőcsepp módszerrel, KRÜSS DSA 30 típusú berendezés alkalmazásával történt. Az értékelés tíz különálló csepp alakjának analízise alapján került elvégzésre, a készülékhez tartozó ADVANCE szoftver segítségével. A számítások során a korábban meghatározott sűrűségértékek kerültek felhasználásra. A sűrűség és felületi feszültség mérése a Budapesti Gazdasági és Műszaki Egyetemen történt.

5.3.2. Felületi és szerkezeti vizsgálatok

A minták UV-kezelését követően a felületet és szerkezetet jellemeztem, a kialakult kémiai és morfológiai változások feltárása érdekében.

FTIR és Raman

A felület degradációjának kvalitatív és kvantitatív jellemzése Fourier-transzformációs infravörös (FTIR) és Raman-spektroszkópiai vizsgálatokkal határoztam meg. A vizsgálatok a Miskolci Egyetem, Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézetében hajtottam végre.

Az FTIR mérések Bruker Tensor 27 típusú spektrométerrel, GladiATR attenuált teljes reflexiós (ATR) feltétellel kerültek elvégzésre 4000–400 cm^{-1} hullámszámtartományban. A Raman-spektroszkópiai vizsgálatok Rigaku Xantus-1 berendezéssel (Rigaku Corporation, Tokió, Japán) hajtottam végre, 532 nm hullámhosszú dióadalézer gerjesztéssel. A spektrumok 400–2500 cm^{-1} tartományban kerültek rögzítésre 50 \times objektív alkalmazásával, 3 cm^{-1} spektrális felbontás mellett. A mérések szobahőmérsékleten (23 ± 2 °C), környezeti légköri körülmények között kerültek elvégzésre.

Röntgen fotoelektron spektroszkópia (XPS)

A vizsgálatok a Debreceni Egyetemen történtek. A felületi kémiai összetétel vizsgálata röntgen fotoelektron spektroszkópia (XPS) alkalmazásával történt. A mérések SPECS XR 50 típusú, kettős anódos, nem monokromatizált röntgenforrás, valamint Phoibos 100 MCD-5 félgömbi energiaanalizátor (SPECS, Berlin) kombinációjával kerültek elvégzésre. A minták réz mintatartókra kerültek rögzítésre kétoldalas ragasztószalag alkalmazásával, majd a mérések előtt egy éjszakán át $\sim 10^{-7}$ mbar vákuumban gáztalanításra kerültek. A mérések során az analitikai tér alapnyomása 5×10^{-10} mbar volt, amely a vizsgálatok alatt 10^{-8} mbar alatt maradt. A spektrumok Al K α sugárással (1486,6 eV) kerültek rögzítésre, 10 kV gyorsítófeszültség és 10 mA emissziós áram (100 W röntgenteljesítmény) mellett. A kötési energia skála kalibrálása frissen tisztított referencia mintán mért Au 4f és Cu 2p csúcsok alapján történt, a gyártó előírásainak megfelelően. A spektrumok kiértékelése CasaXPS szoftverrel történt, ahol a kötési energia skála a PEEK-ben található nem szubsztituált aromás szénhez (284,5 eV) lett rögzítve.

AFM

A vizsgálat a Budapesti Gazdasági és Műszaki egyetemen hajtották végre. Az atomerő-mikroszkópos (AFM) vizsgálatok Nanosurf Flex típusú berendezéssel, dinamikus (tapping) üzemmódban kerültek elvégzésre, TAP190Al-G típusú konzol alkalmazásával (Nanosurf AG, Liestal, Svájc). A felvételek 5 nm felbontással készültek. A minták mechanikusan kerültek rögzítésre egy fém mintatartóra, és a vizsgálatok során 3×3 μm méretű felvételek készültek a minta középvonalaiban, 1–2 mm-es lépésközökkel. A mérések szobahőmérsékleten, környezeti

légköri körülmények között kerültek elvégzésre. A képeket a gyártó által javasolt Gwyddion szoftverrel értékeltem ki.

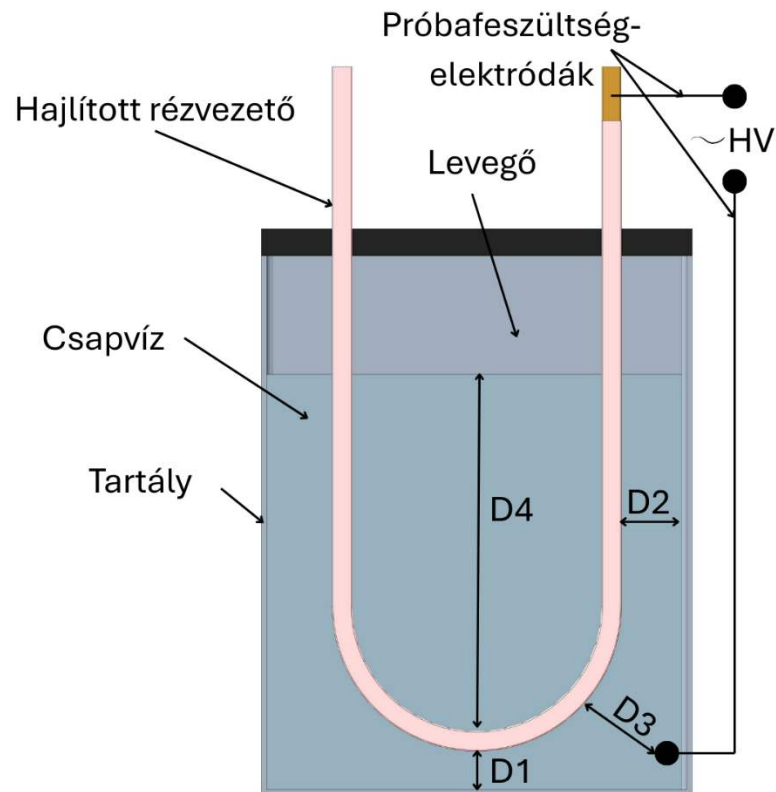
5.3.3. Villamos vizsgálatok

A villamos átütési szilárdság meghatározását Schleich GLP2 típusú berendezéssel hajtottam végre. (Schleich GmbH, Hemer, Németország). A mérések során a feszültség lineárisan, 500 V/s meredekséggel került növelésre, 30 mA áramkorlát mellett. Az alkalmazott maximális feszültség 30 kV volt. A vizsgálatot az Audi Hungária Zrt.-nél végeztem el.

A feszültségfelfutás mértéke az IEC 60851-5 szabvány (Test 13) [128] előírásainak megfelelően került megválasztásra, ugyanakkor a teljes mérési elrendezés nem felelt meg teljes mértékben a szabványnak. A mintageometria és a mechanikai előkészítés az IEC 60851-5 (Test 13, 4.7 szakasz, téglalap keresztmetszetű vezetők) előírásai alapján készítettem, azonban a mérési konfiguráció eltért attól, mivel a szabvány által javasolt ≤ 2 mm szemcseméretű acél sörétek helyett földelektródként csapvizet használtam. A villamos átütési szilárdság vizsgálatának elrendezése a 14. ábrán látható sematikusán.

A csapvíz alkalmazása egyenletesebb elektromos tér kialakítását tette lehetővé, valamint csökkentette a mechanikai és koronakisülésből eredő károsodások kockázatát [129–131]. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy a csapvíz ionos komponensei kölcsönhatásba léphetnek az UV-kezelés hatására módosult felületekkel, így a mért átütési szilárdság a felületi oxidáció és a mérési környezet együttes hatását tükrözheti, nem kizárólag az anyag belső villamos tulajdonságait.

Minden vizsgálati feltétel mellett öt ismételt mérést végeztem el, majd az eredményeket átlagolással határoztam meg. A dielektromos átütési szilárdság (a továbbiakban: DÁSZ) meghatározása a mért átütési feszültség és a 0,15 mm vastagságú PEEK szigetelőréteg hányadosaként számoltam.



14. ábra Az IEC 60851-5 geometriáján alapuló berendezés sematikus ábrája, amely a villamos átütési vizsgálati elrendezés szemléltetésére szolgál. D_1 és $D_2 \geq 5$ mm, $D_3 = 30$ mm, valamint $D_4 \geq 90$ mm.

5.4. Penetrációs kísérletek

A penetrációs vizsgálatok célja a gyanták kapillaris penetrációs viselkedésének és kinetikájának meghatározása volt különböző kísérleti feltételek mellett. A mérések egységes módszertan szerint végeztem, biztosítva az egyes vizsgálatok közötti összehasonlíthatóságot. A különböző kísérletek során kizárólag a vizsgált paraméterek kerültek módosításra. A vizsgálatokat az Audi Hungária Zrt.-nél végeztem el.

5.4.1. Izoterm penetrációs kísérletek a Washburn-modell kiterjesztéséhez

Az izoterm penetrációs kísérletek során a méréseket 23 °C, 40 °C, 60 °C és 80 °C hőmérsékleteken hajtottam végre, $\pm 2,5$ °C hőmérsékleti pontossággal. A vizsgálatok standard laboratóriumi körülmények között történtek (23 ± 2 °C környezeti hőmérséklet, $30 \pm 5\%$ relatív páratartalom, atmoszférikus nyomás). A kívánt termikus állapotok beállítása Heidolph MR Hei-Standard típusú fűtőlappal biztosítottam.

A kísérletek során a kapilláris résmérete 0,1; 0,2 és 0,3 mm értékekre állítottam be. A 23 °C és 40 °C hőmérsékleteken, a penetrációs úthosszt 30 mm-nek választottam meg, míg, a 60 °C és 80 °C hőmérsékleteken a vizsgált maximális penetrációs hosszt 60 mm-re növeltem.

Minden kísérleti feltétel mellett öt egymástól független mérés hajtottam végre. Az egyes vizsgálatok között a rézvezetők minden esetben új mintákra cseréltem, a penetrációs készüléket, pedig Elantas EpoxyLite® EIP 4693 oldószerrel tisztítottam meg a reprodukálhatóság biztosítása érdekében.

5.4.2. Izoterm penetrációs kísérletek az UV-kezelés hatásának vizsgálatára

A penetrációs időmérések különböző fajlagos besugárzási energiával kezelt, PEEK bevonatú rézvezetőkön végeztem el. A vizsgálatok a korábban ismertetett eljárás szerint történtek, azonos környezeti és mérési feltételek mellett.

A kísérletek során a kapilláris hézag 0,2 mm-re, míg a kapilláris hossza 60 mm-re állítottam be. A penetrációs folyadékfront előrehaladása a korábban ismertetett jelölések mentén került rögzítésre (lásd 60 mm penetrációs úthossz 5.1.1. fejezet.). A vizsgálatok során azonos geometriai és mérési feltételek kerültek alkalmazásra.

Minden kísérleti feltétel mellett három egymást követő mérést végeztem el, azonos körülmények között, majd az eredményeket átlagoltam.

5.4.3. Hőmérséklet-gradiens hatásának vizsgálata penetrációs kísérletekkel

A vizsgálatokat izoterm és nem izoterm körülmények között hajtottam végre. Jelen kísérlet sorozatban az izoterm kísérletek referenciául szolgálnak a nem izoterm körülmények között végzett kísérletek kiértékelése során.

Az izoterm referencia mérések 55, 60, 80 és 110 °C névleges hőmérsékleteken végeztem el, $\pm 2,5$ °C hőmérsékleti pontossággal.

A nem izoterm kísérletek során a penetrációs készülék mentén különféle mértékű hőmérséklet-gradienst alakítottam ki. Ennek eredményeként a kapilláris mentén kialakított hőmérséklet-gradienst névleges bemeneti–kilépési hőmérsékletpárokkal jellemeztem (pl. 40–85 °C, 60–40 °C, 110–60 °C). A kísérleti mátrixot a 2. táblázat foglalja össze. A hőmérsékletpárok első eleme a bemeneti (kapilláris kezdete), míg második eleme a kilépési (kapilláris vége) hőmérsékletet jelöli. A kísérleti rendszer korlátai miatt a kialakuló hőmérsékletmező nem volt szigorúan állandó, hanem térben és időben változó eloszlást mutatott a kapilláris mentén.

2. táblázat A kísérleti mátrix áttekintése, beleértve az alkalmazott kapilláris konfigurációkat és vizsgált termikus feltételeket. Az izoterm mérések diszkrét hőmérsékleteken kerültek elvégzésre, míg a nem izoterm eseteket a kapilláris mentén megadott bemeneti–kimeneti hőmérsékletpárok jellemzik.

Konfiguráció	Termikus feltételek	Hőmérséklet / Tartomány (°C)
Nyitott	Izotermikus	55, 62, 81, 85, 110
Nyitott	Gradiens	40–85, 110–60, 60–40, 120–50, 40–60, 40–90
Zárt	Izotermikus	57, 60, 83, 85, 108
Zárt	Gradiens	45–60, 80–100, 100–70, 80–50, 120–50

6. Primer eredmények és azok értékelése

Ebben a fejezetben a végrehajtott kísérletek eredményeit mutatom be, illetve, értékelem azokat. Az elemzés során külön figyelem irányul az izoterm és nem izoterm viszonyok közötti eltérésekre, valamint az UV-kezelés és a hőmérséklet-gradiens hatására bekövetkező változásokra.

6.1. A gyanták termofizikai tulajdonságai

A mérések eredményei az 3. táblázat-

7. táblázat. táblázatokban kerülnek összefoglalásra, míg a különböző termofizikai tulajdonságok hőmérsékletfüggése a 16-18. ábrákon látható. A két gyanta tulajdonságainak hőmérsékletfüggését leíró félempirikus összefüggések az 8. táblázatban kerülnek bemutatásra.

Mivel az Arrhenius-modell nem írta le megfelelő pontossággal a dinamikai viszkozitás mért értékeit, ezért annak leírására a Vogel–Fulcher–Tammann (VFT) modellt lett alkalmazva [132–135]:

$$\mu = \exp \left[a + \frac{b}{T - T_0} \right]$$

ahol a (–) és b (K) félempirikus állandók, T (K) az aktuális hőmérséklet, míg T_0 (K) az a hőmérséklet, amelynél a viszkozitás a hőmérséklet csökkenésével a végtelenhez tart.

A felületi feszültség hőmérsékletfüggésének leírására az Eötvös-egyenlet került alkalmazásra [118,136]:

$$\sigma \cdot V^{2/3} = k \cdot (T_c - T)$$

ahol σ (N/m) a felületi feszültség, V (m³/mol) a móltérfogat (a moláris tömeg és a sűrűség hányadosaként számítva), T_c (K) a kritikus hőmérséklet, míg k (J/mol^{2/3}K) az Eötvös-állandó, amelynek átlagos értéke szerves folyadékokra $2,22 \times 10^{-7}$ J/mol^{2/3}K és amelyet jelen munkában a gravitációs gyorsulás javított értékének figyelembevételével módosítottuk [136].

Az epoxigyanták molekulatömege jellemzően 1500–30000 g/mol tartományba esik [137], míg a poliészter gyanták esetében ez 1200–36000 g/mol [138]. A jelen vizsgálat során az EP-201 gyantára 3850 g/mol, míg a V-4200 gyantára 4250 g/mol érték került becslésre, amely lehetővé tette az átlagos Eötvös-állandó ($2,22 \times 10^{-7}$ J/mol^{2/3}K) közelítő visszaadását (lásd 18. ábra). Megjegyzendő, hogy ezek az értékek a szakirodalomban megadott tartományon belül helyezkednek el [137,138].

Az Eötvös-szabály értelmében a felületi feszültség a kritikus hőmérséklet elérésekor nullává válik. A 18. ábra és az

7. táblázat alapján a kritikus hőmérséklet EP-201 gyanta esetén 656 °C, míg V-4200 gyanta esetén 586 °C. Fontos kiemelni, hogy az ipari gyakorlatban az impregnáló gyanták kikeményítési hőmérséklete jellemzően nem haladja meg a 180 °C-ot.

A V-4200 gyanta kontakt szöge a rézvezető és a papír felületén szobahőmérsékleten rendre $\theta_r = (26,3 \pm 1,7)^\circ$ és $\theta_p = (29,7 \pm 1,8)^\circ$, míg 80 °C-on $\theta_r = (8,0 \pm 1,2)^\circ$ és $\theta_p = (8,9 \pm 1,0)^\circ$. Az EP-201 gyanta esetén ezek az értékek szobahőmérsékleten $\theta_r = (26,7 \pm 4,0)^\circ$ és $\theta_p = (30,8 \pm 2,4)^\circ$, míg 80 °C-on $\theta_r = (11,6 \pm 1,2)^\circ$ és $\theta_p = (10,5 \pm 0,8)^\circ$.

3. táblázat Különféle impregnálógyanták peremszögei (θ_r) a hőmérséklet függvényében PAI bevonatos rézvezetők felületén

Gyanta	Hőm. [°C]	Mérések száma					Átlag	Szórás
		1.	2.	3.	4.	5.		
V-4200	25	24,0	25,8	28,9	26,5	26,4	26,3	1,7
	40	16,1	16,3	15,4	14,7	10,6	12,2	1,4
	60	11,4	9,7	9,0	9,3	11,7	10,2	1,4
	80	8,9	6,6	7,3	7,8	9,4	8,0	1,2
EP-201	25	20,5	25,5	31,1	27,7	28,9	26,7	4,0
	40	12,6	12,2	14,2	13,4	13,0	13,1	0,8
	60	11,2	12,0	9,8	10,9	15,9	11,9	2,2
	80	11,1	10,5	12,7	12,8	10,8	11,6	1,2

A V-4200 gyanta dinamikai viszkozitása szobahőmérsékleten $2,30 \pm 0,07$ Pa·s, míg 75 °C-on $0,111 \pm 0,005$ Pa·s, az EP-201 gyanta esetén pedig rendre $1,53 \pm 0,05$ Pa·s és $0,0413 \pm 0,0005$ Pa·s.

A V-4200 gyanta sűrűsége $1115,6 \pm 0,2$ kg/m³ (25°C) és $1070,8 \pm 0,2$ kg/m³ (80 °C), míg az EP-201 gyanta esetén $1126,2 \pm 0,2$ kg/m³ (25°C) és $1084,6 \pm 0,2$ kg/m³ (80 °C).

A V-4200 gyanta felületi feszültsége $35,8 \pm 0,5$ mN/m (25°C) és $30,9 \pm 0,5$ mN/m (80 °C), míg az EP-201 gyanta esetén $37,0 \pm 0,6$ mN/m (25°C) és $32,6 \pm 0,4$ mN/m (80 °C).

4. táblázat Különféle impregnálógyanták peremszögei (θ_p , °) a hőmérséklet függvényében a horonyszigetelő papír felületén

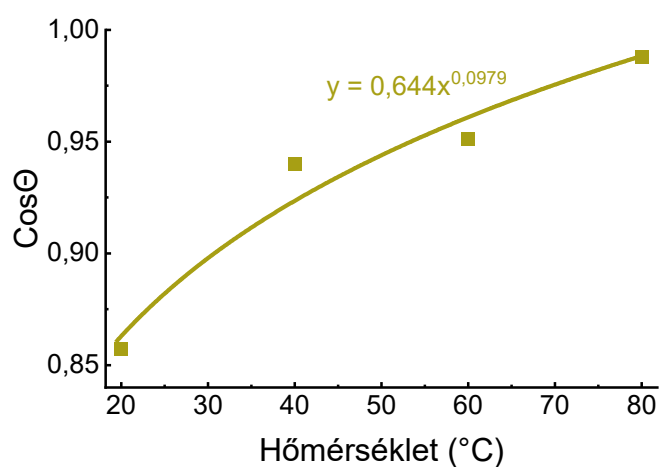
Gyanta	Hőm. [°C]	Mérések száma					Átlag	Szórás
		1.	2.	3.	4.	5.		
V-4200	25	30,1	26,6	30,5	31,4	29,9	29,7	1,8
	40	17,2	16,6	15,9	17,5	15,2	16,5	0,8
	60	10,3	12,4	13,6	10,5	11,9	11,7	1,2
	80	8,8	10,4	8,5	7,4	9,5	8,9	1,0
EP-201	25	27,7	32,6	33,7	29,5	30,3	30,8	2,4
	40	12,3	11,3	13,9	14,1	13,2	13,0	1,0
	60	12,3	11,3	10,5	10,7	11,5	11,3	0,6
	80	9,5	11,6	10,8	9,7	10,9	10,5	0,8

További peremszög mérések lettek még végre hajtva a hőmérséklet-gradiens hatásának vizsgálata során a hatást vizsgáló készülék kapillárisának falán, valamint a kapillárist lezáró kapton fólián. A peremszög mérések alapján megállapítható, hogy az EP-201 gyanta peremszöge, az elvártnak megfelelően, a hőmérséklet növekedésével csökken mind az acél, mind a kapton felületen. Az eredményeket a

5. táblázat foglalja össze, míg a peremszög koszinuszának hőmérsékletfüggését a 15. ábra szemlélteti. Az acél felületen a peremszög jelentős csökkenést mutat (31° -ról 9° -ra), ami a nedvesítés javulásának jele, míg a kapton esetében a változás mérsékeltebb. A $\cos\Theta$ értéke a hőmérséklet növekedésével növekszik, amelyet a bemutatott empirikus összefüggés is megfelelően leír. Ez a viselkedés összhangban van a kapilláris penetrációt meghatározó határfelületi erők erősödésével magasabb hőmérsékleten.

5. táblázat EP-201 gyanta peremszögének hőmérsékletfüggése a kapilláris acél felületén és a kapton fólián

Hőmérséklet (°C)	Peremszög, acél (°)	Peremszög, kapton (°)
20	31 ± 1	19 ± 2
40	20 ± 3	17 ± 1
60	18 ± 2	17 ± 1
80	9 ± 3	14 ± 2



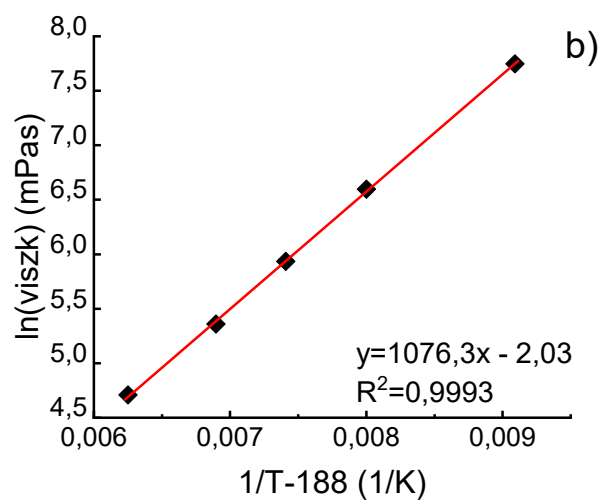
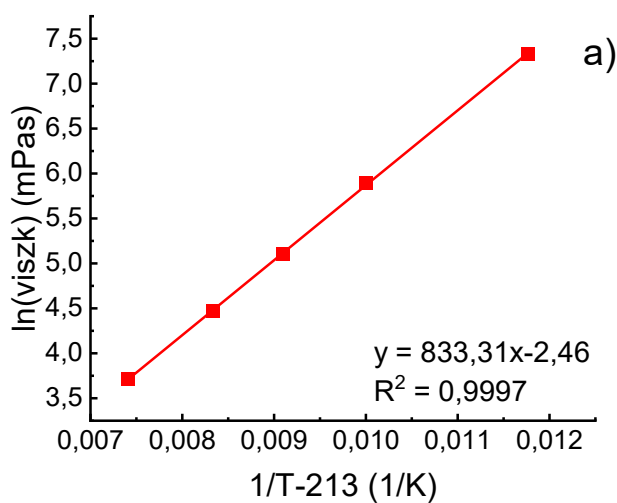
15. ábra EP-201 gyanta peremszögének koszinuszának hőmérsékletfüggése a hőmérséklet-gradiens behatását vizsgáló penetrációs készülék kapillárisának acél falán

A 15. ábráról az illesztést követően, majd a hőmérséklet szerinti deriválás után, meghatározható a peremszög hőmérséklet szerinti deriváltja, amely:

$$\frac{d\cos\theta}{dT} = 0,0630 \cdot T^{-0,9021} \quad (30)$$

6. táblázat Különféle impregnáló gyanták dinamiai viszkozitása (mPas) a hőmérséklet függvényében

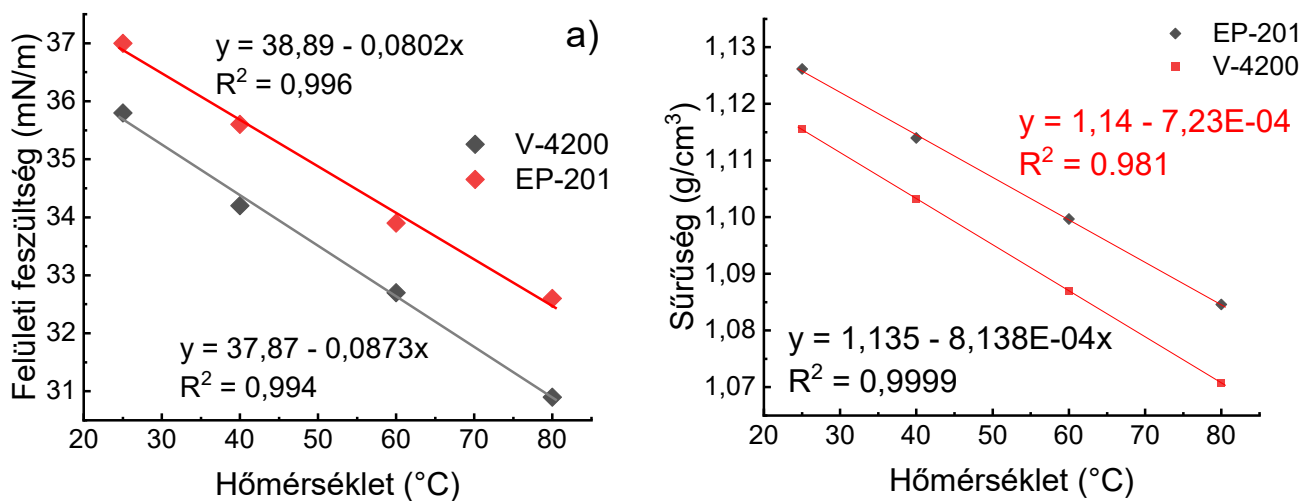
Gyanta	Hőm. [°C]	Mérések száma						Átlag	Szórás
		1	2	3	4	5	6		
V-4200	25	2430	2364	2234	2301	2280	2265	2300	72
	40	774	753	738	717	714	702	733	27
	60	218	214	213	212	209	209	213	4
	80	112	112	111	111	110	110	111	1
EP-201	25	1581	1575	1545	1537	1491	1461	1530	47
	40	373	370	365	362	358	355	364	7
	60	88	88	88	89	86	86	87	1
	80	42	41	42	41	41	41	41	0



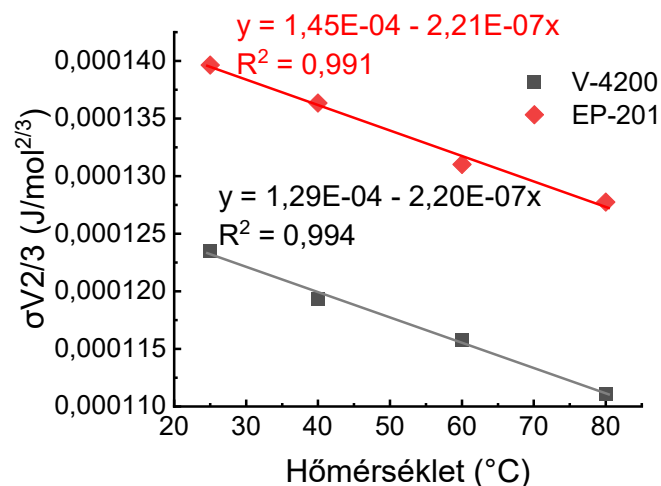
16. ábra Az különféle gyanták viszkozitásának hőmérsékletfüggése a Vogel–Fulcher–Tammann modell alapján a) EP-201 b) V-4200

7. táblázat A gyanták sűrűségének és felületi feszültségének hőmérséklet függése

Gyanta	Hőm. [°C]	Sűrűség [g/cm ³]	Felületi feszültség [mN/m]
V-4200	25	1.11559 ± 0.00002	35.8 ± 0.5
	40	1.10324 ± 0.00003	34.2 ± 0.4
	60	1.08702 ± 0.00003	32.7 ± 0.5
	80	1.07080 ± 0.00001	30.9 ± 0.5
EP-201	25	1.12616 ± 0.00010	37.0 ± 0.6
	40	1.10977 ± 0.00867	35.6 ± 0.8
	60	1.09968 ± 0.00012	33.9 ± 0.4
	80	1.08459 ± 0.00013	32.6 ± 0.4



17. ábra Különféle gyanták a) felületi feszültségének és b) sűrűségének hőmérsékletfüggése



18. ábra A két gyanta $\sigma V^{2/3}$ értékének hőmérsékletfüggése az Eötvös-modell alapján

8. táblázat A gyanták egyes termofizikai tulajdonságainak hőmérsékletfüggését leíró egyenletek (T [K])

Termofizikai tulajdonság	EP-201	V-4200
Viszkozitás (mPas)	$\ln\mu \cong \frac{833.3}{T - 213} - 2.462$	$\ln\mu \cong \frac{1076}{T - 188} - 2.034$
Felületi feszültség (mN/m)	$\sigma \cong 38.9 - 0.0802 \cdot (T - 273)$	$\sigma \cong 38.0 - 0.0873 \cdot (T - 273)$
Sűrűség (g/cm ³)	$\rho \cong 1.14 - 7.23 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273)$	$\rho \cong 1.14 - 8.14 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273)$

6.2. Izoterm penetráció és modell validáció

A fejezet felépítése az általam végrehajtott vizsgálatok sorrendjét követi: elsőként a gyanták termofizikai tulajdonságainak elemzését mutatom be, ezt követi a téglalap keresztmetszetre kiterjesztett Washburn-modell izoterm körülmények közötti validálása, végül pedig a penetrációs kinetika részletes vizsgálatát hajtom végre.

6.2.1. A penetrációs modell validálása izoterm körülmények között

A két gyantára vonatkozóan, különböző hőmérsékleteken meghatározott, a kilenc és tíz előre definiált penetrációs hossz eléréséhez tartozó mért idők a 9. táblázat-

10. táblázatban kerülnek összefoglalásra. A táblázatok alapján megállapítható, hogy az egymást követő időintervallumok minden oszlopban közel azonosak, ami jól közelíti a Washburn-féle $x^2 \sim t$ összefüggést. A 30 mm és 60 mm penetrációs hosszhoz tartozó mért értékeket Z-próbával [139] ellenőriztük az esetleges kiugró értékek azonosítása érdekében. Minden mérési sorozatban két kiugró érték került azonosításra, amelyeket az átlagolás során elhagytunk. Ennek megfelelően a 9. táblázat

10. táblázatok az öt független mérésből származó, három érték átlagaként meghatározott penetrációs időket tartalmazzák.

A penetrációs hossz időfüggését a 19a) -d). ábrák mutatják be a két gyanta esetében, két különböző hőmérsékleten. Minden ábrán két elméleti görbe szerepel, amelyek a (15c) és (16e) egyenletek alapján kerültek meghatározásra. A (16e) egyenlethez tartozó görbék piros színnel kerültek ábrázolásra, mivel feltételezésünk szerint a kísérletek során elsősorban a gyanta alsó részének mozgását figyeltük meg. Ugyanakkor a (15c) egyenlet szerinti görbék kék színnel szintén bemutatásra kerültek, mivel a megfigyeléseinket valószínűleg a gyanta felső rétegének viselkedése is befolyásolta. A 9. táblázat-

10. táblázatokban szereplő kísérleti pontok jól illeszkednek az elméleti görbékhez, mivel azok a piros és kék görbék közötti tartományban helyezkednek el a 19. ábrán. A mért és számított penetrációs idők összehasonlítása a 20. ábrán látható, ahol a különbség mindössze 1,16%, ami tovább erősíti az eredmények megbízhatóságát.

9. táblázat Az impregnáló gyanták mért penetrációs idejei (s) különböző hőmérsékleteken, különböző kapilláris résméretekkel (mm), a feltüntetett értékek három független kísérlet átlaga

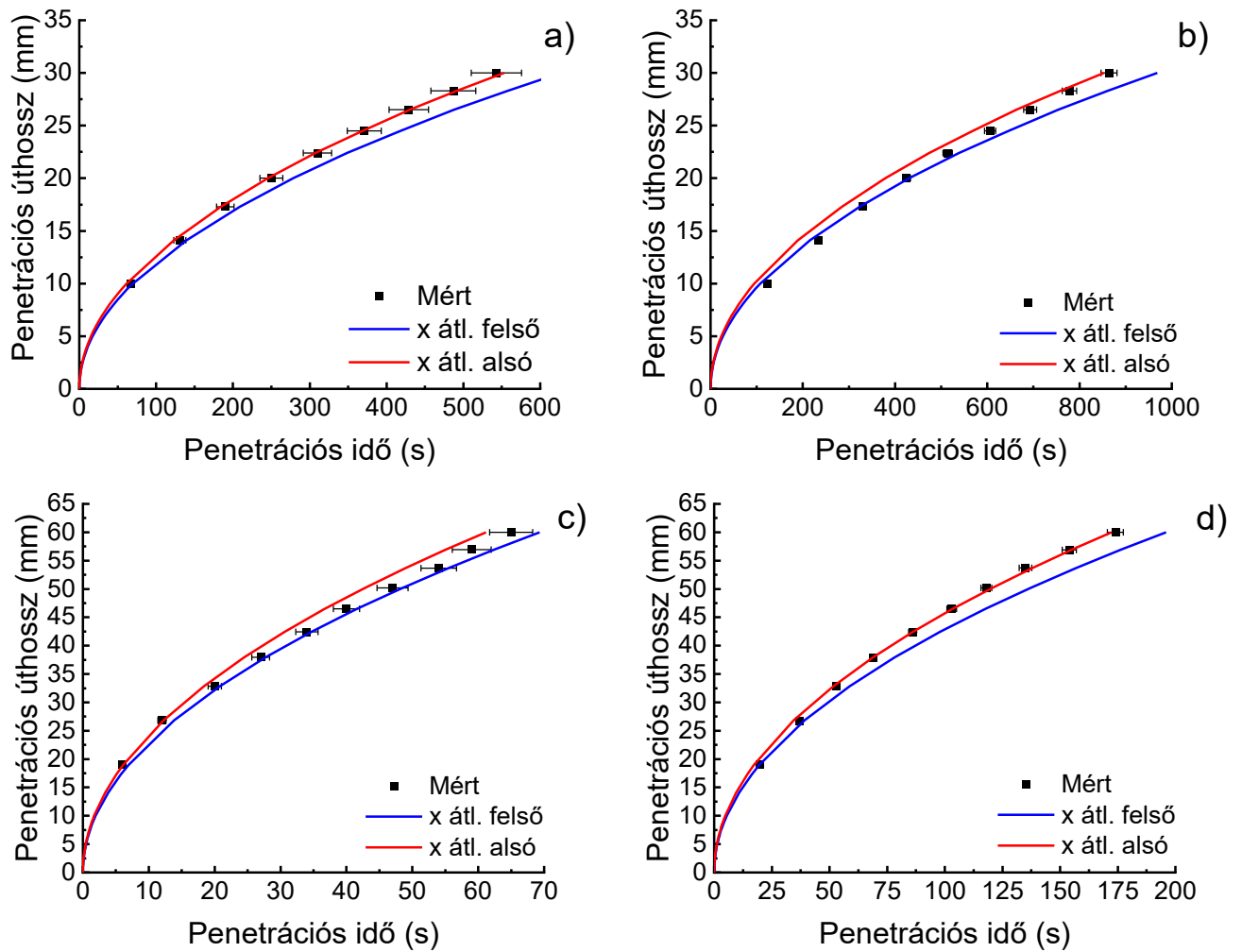
	x [mm]	V-4200			EP-201		
		0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
25 °C	10,0	212	124	82,3	148	67,7	40
	14,1	415	233	149	291	131	80
	17,3	611	331	212	422	190	118
	20,0	808	425	269	547	250	154
	22,4	1002	514	321	670	310	190
	24,5	1192	606	379	796	371	228
	26,5	1391	693	438	923	429	264
	28,3	1576	778	494	1042	487	300
	30,0	1762	864	556	1164	543	337
Szórás	-	29,1	15,4	30,2	41,3	33,7	4,23

40 °C	10,0	70,4	44,1	26,8	32,5	15,5	8,43
	14,1	134	81,4	48,3	64,4	29,2	17,7
	17,3	196	114	67,6	97,4	43,2	26,4
	20,0	259	146	85,2	127	56,4	35,7
	22,4	323	173	103	156	69	45,3
	24,5	388	200	121	183	82	53,3
	26,5	447	227	140	210	96	61,4
	28,3	506	256	158	235	110	69,4
	30,0	565	282	177	260	123	75,3
Szórás	-	24,4	19,2	5,52	4,41	1,13	1,62
60 °C	19,0	72,4	36,2	19,6	29,3	16,3	8,43
	26,8	143	68,5	37,2	56,1	28,5	17,8
	32,9	212	99,4	58,7	83,3	39,4	24,3
	37,9	273	131	81,4	111	51,2	31,7
	42,4	339	160	104	139	63,2	39,5
	46,5	403	191	129	165	75,2	46,7
	50,2	467	228	150	189	89,1	54,8
	53,7	531	258	170	214	103	61,1
	56,9	597	289	188	239	117	68,5
	60,0	664	320	206	264	128	76,6
Szórás	-	30	10	5,36	11,4	3,23	2,54
80 °C	19,0	39,4	20,3	12,4	13,3	6,5	4,6
	26,8	78,8	37,3	23,2	25,9	12,4	8,23
	32,9	114	53,4	35,1	37,3	20,4	13,5
	37,9	149	69,2	47,7	51,3	27,4	17,2
	42,4	185	86,3	58,4	64,2	34,5	21,7
	46,5	222	103	70,1	78,7	40,2	25,6
	50,2	259	118	81,6	91,3	47,5	29,4
	53,7	296	135	89,2	102	54,3	33,5
	56,9	332	154	99,4	113	59,2	37,3
	60,0	369	174	109	124	65,3	40,9
Szórás	-	9,42	3,27	4,34	4,12	4,39	2,46

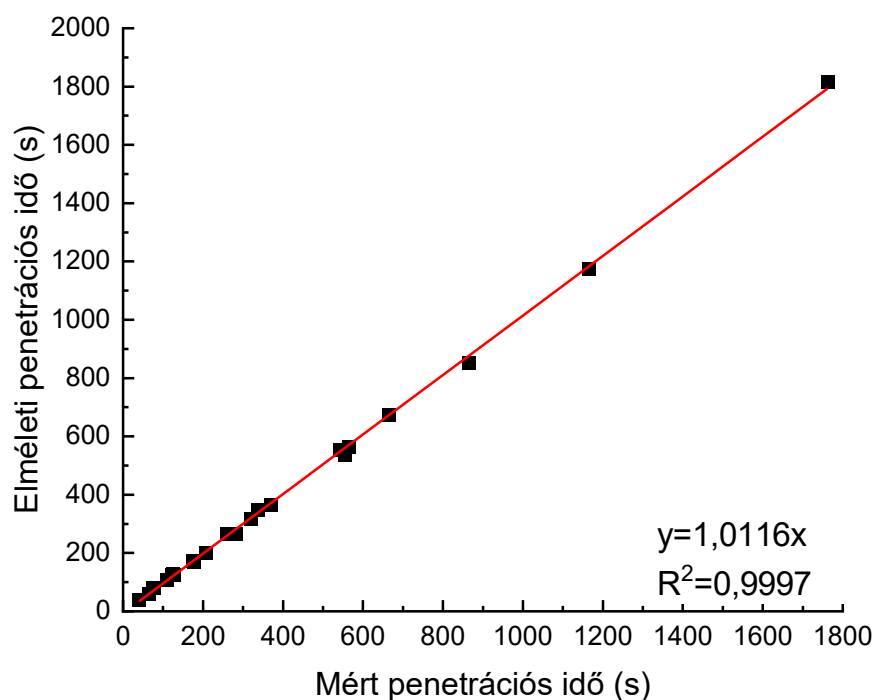
10. táblázat Az impregnáló gyanták elméleti penetrációs idejei (s) a (3) egyenlet alapján különböző hőmérsékleteken és résméreteknél (mm), valamint penetrációs úthossz végén mért (lásd 9. táblázat Az impregnáló gyanták mért penetrációs idejei (s) különböző hőmérsékleteken, különböző kapilláris résméretekkkel (mm), a feltüntetett értékek három független kísérlet átlaga) és az elméleti idők eltérése (%)

	V-4200			EP-201		
	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
25 °C	202	95,2	60,6	131	61,4	39,3
	403	190	119	261	123	77,2
	605	284	179	392	184	116
	806	379	238	523	246	155
	1008	474	298	653	307	193
	1210	569	358	784	369	232
	1411	663	417	914	430	271
	1613	758	477	1045	492	309
	1815	853	537	1176	553	348
Diff.	-2%	1%	4%	-1%	-2%	-3%
40 °C	63,4	30,2	19,7	30,3	14,4	9,23
	126	59,5	37,6	59,5	28,4	18,6
	188	89,4	56,2	89,4	42,5	26,3
	251	118	74,4	118	56,3	35,2
	314	148	93,6	148	70,6	44,6
	377	177	112	178	84,3	53,3
	439	207	130	207	98,4	62,7
	502	236	149	237	112	71,5
	565	266	168	267	126	79,3
Diff.	0%	6%	5%	-2%	-3%	-5%

60 °C	67,6	32,5	20,3	27,6	13,4	8,2
	135	63,6	40,5	53,6	25,3	16,4
	202	95,4	60,1	80,3	38,3	24,3
	269	127	80,5	107	50,2	32,8
	336	158	100	134	63,7	40,5
	404	190	120	160	76,8	48,3
	471	222	140	187	88,2	56,1
	538	253	160	214	101	64,1
	606	285	179	241	113	71,5
	673	317	199	267	126	79,3
Diff.	-1%	1%	3%	-1%	2%	-4%
80 °C	37,2	17,7	11,2	13,8	6,54	4,52
	73,6	34,2	22,5	26,5	12,3	8,61
	110	52,3	32,6	39,3	18,5	12,3
	147	69,7	43,6	52,7	24,3	15,4
	183	86,5	54,3	65,6	31,4	19,8
	220	103	65,7	78,5	37,5	23,5
	257	121	76,4	91,6	43,2	27,6
	293	138	87,8	104	49,8	31,3
	330	155	97,6	117	55,8	35,4
	367	172	108	130	61,7	39,5
Diff.	-2%	1%	-5%	-5%	7%	4%



19. ábra A különféle gyanták mért és elméleti penetrációs úthosszának összehasonlítása a penetrációs idő függvényében 0,2 mm részmeret esetén. A négyzet alakú jelölők az 5. táblázatban szereplő kísérleti adatokat mutatják, míg a folytonos vonalak az elméleti görbéket jelölik. A kék görbe a (15c) egyenlet, a piros görbe pedig a (16e) egyenlet alapján számított eredményeket reprezentálja. a) EP-201 szobahőmérsékleten, b) V-4200 szobahőmérsékleten c) EP-201 80 °C-on, d) V-4200 80 °C-on.

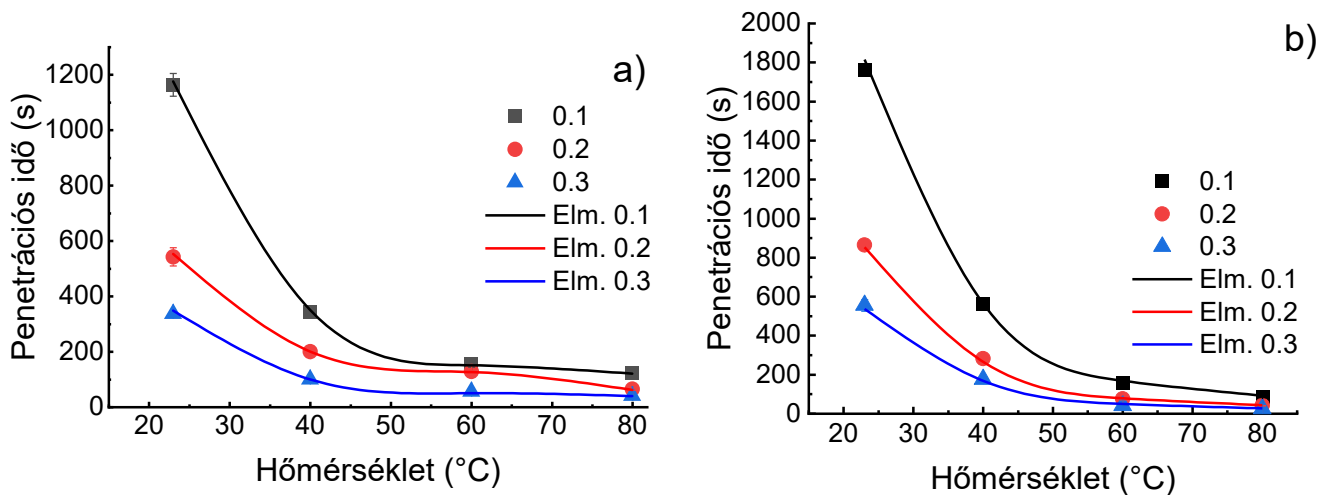


20. ábra A mért és az elméleti penetrációs idők összehasonlítása

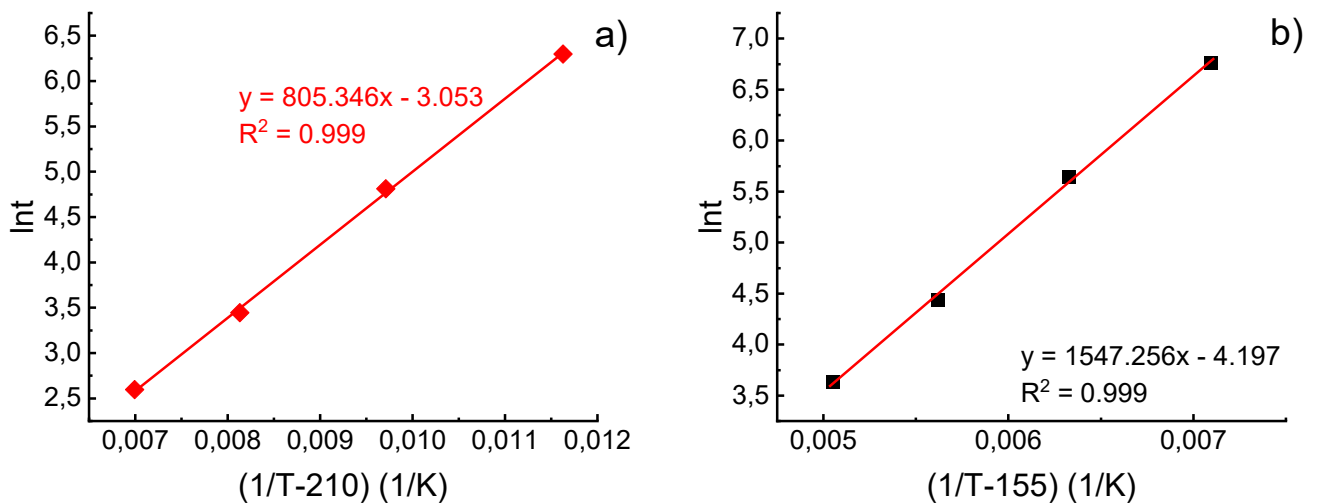
6.2.2. A penetrációs kinetika hőmérsékletfüggése

A különböző impregnáló gyanták penetrációjának hőmérsékletfüggése a 21a) -b). ábrákon látható. A 21a) -b). ábrákon bemutatott eredmények alapján egyértelmű, hogy a hőmérséklet növekedésével a penetrációs idő jelentősen csökken, ami elsősorban a gyanták viszkozitásának erős hőmérsékletfüggésével magyarázható. Emellett a kapilláris résméret hatása is jól megfigyelhető, mivel nagyobb résméretes esetén gyorsabb penetráció következik be, összhangban a kapilláris erők és az áramlási ellenállás közötti egyensúllyal.

Az elméleti és kísérleti eredmények közötti egyezés mindkét gyanta esetében jónak tekinthető, ami igazolja az alkalmazott modell érvényességét a vizsgált hőmérséklet- és geometriai tartományban. A 22. ábrán a penetrációs idő természetes logaritmusának a hőmérséklet reciprokának függvényében lineáris kapcsolatot mutat, ami lehetővé teszi az Arrhenius-típusú leírás alkalmazását.



21. ábra A különféle gyanták penetrációs idejének hőmérsékletfüggése téglalap keresztmetszetű kapillárisban, különböző résméretes (mm) esetén. a) V-4200 b) EP-201



22. ábra Különböző impregnálógyanták penetrációs idejének természetes logaritmus az $1/T$ függvényében a) EP-201 b) V-4200

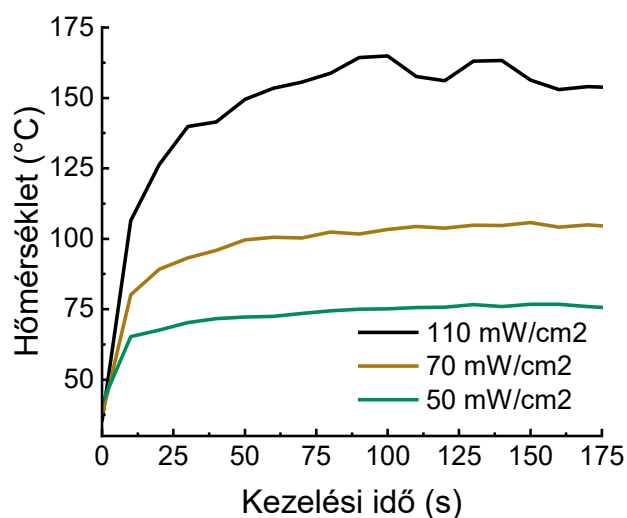
2 Tézis Kísérleti validáltam a téglalap keresztmetszetű kapillárisra levezett modell-egyenletet. Kimutattam, hogy a mért penetrációs idők az 1A tézisben megadott egyenletek által meghatározott elméleti görbék közötti tartományba esnek, ami alátámasztja a modell fizikai megalapozottságát. A mért és számított értékek közötti eltérés mindössze 1,16%, ami igazolja a modell pontosságát és megbízhatóságát.

6.3. UV-kezelés hatásának vizsgálata

Az UV-kezelés a PEEK felületi tulajdonságainak módosítására szolgáló egyszerű és iparilag is alkalmazható eljárás, amely elsősorban felületi oxidáció révén változtatja meg az anyag kémiai állapotát. Jelen alfejezet célja annak vizsgálata, hogy az UV-indukált felületi módosulások miként befolyásolják az impregnálógyanta penetrációs viselkedését, valamint a kialakuló szigetelőrendszer villamos tulajdonságait.

6.3.1. Felületi kémiai változások UV-kezelés hatására

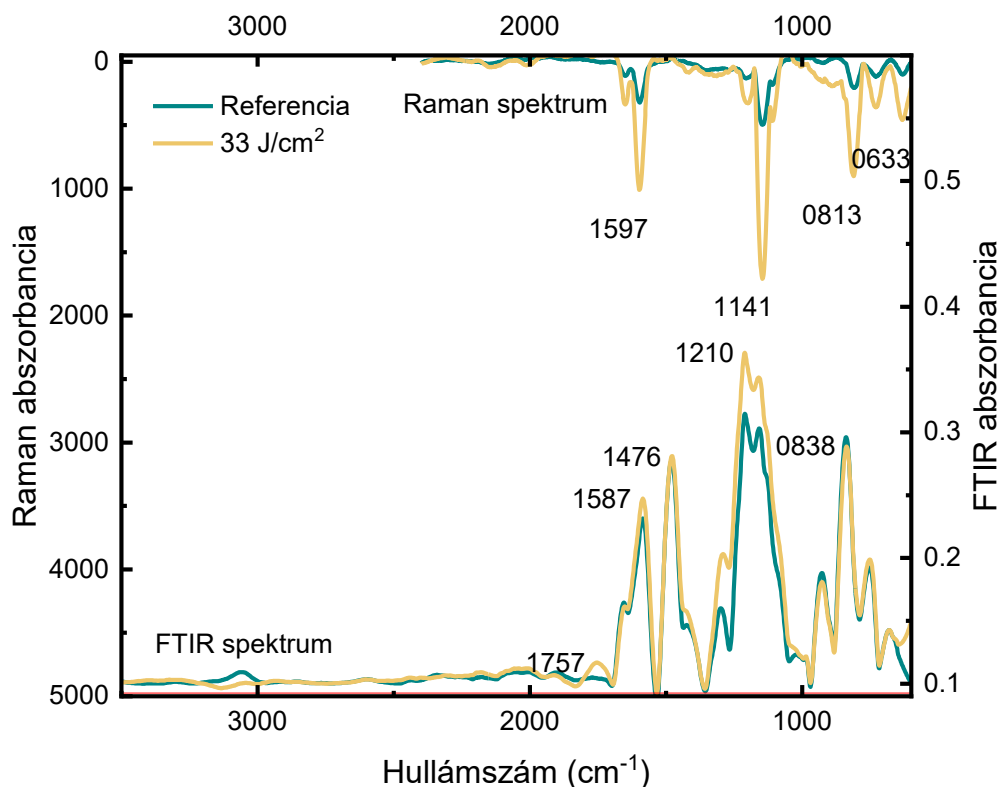
Az UV-kezelés során, 110 mW/cm² intenzitás mellett a felületi hőmérséklet a 23. ábrán látható módon alakul, és megközelíti a ~170 °C értéket. Alacsonyabb intenzitások (70 és 50 mW/cm²) esetén lényegesen alacsonyabb maximális hőmérsékletek adódtak. Figyelembe véve, hogy a PEEK R hőosztályba tartozik (≥ 220 °C az IEC 60085 [140] szerint), a mért hőmérsékletek a térfogati termikus degradációhoz tartozó tartomány alatt maradnak. Ennek megfelelően a megfigyelt felületi változások elsősorban fotokémiai oxidációnak tulajdoníthatók, ugyanakkor a lokális felületi felmelegedés oxidációs kinetikára gyakorolt hatása nem zárható ki teljes mértékben.



23. ábra A minták átlaghőmérsékletének időfüggése az UV-kezelés során

Az FTIR- és Raman-spektroszkópia során rögzített abszorbancia spektrumok a 24. ábrán láthatók. Az ábrán a PEEK jellegzetes csúcsai kerültek azonosításra. A hozzárendelt Raman- és FTIR-csúcsokat az 11. táblázat-

12. táblázatok foglalják össze.



24. ábra Az UV-kezelés hatása a Raman- és FTIR-spektrumokra; a 33 J/cm^2 fajlagos besugárzási energiájú és 110 mW/cm^2 fajlagos intenzitású UV-kezelt minta (piros vonal) összehasonlítása a kezeletlen referencia mintával (fekete vonal). A csúcsok felett feltüntetett számok az azonosított jellegzetes hullámszámokat jelölik.

11. táblázat A Raman-spektrum változásai UV-kezelés hatására [141]

Hullámszám (cm^{-1})	Kötési típus	Abszorbancia (a.u.)	Csúcsintenzitás változása UV-kezelés hatására
646	$\gamma_{\text{C-H}}$ síkon kívüli hajlítási rezgés	500	Csökken
825	$\gamma_{\text{C-H}}$ síkon kívüli hajlítási rezgés	750	Csökken
1146	Éter $\gamma_{\text{C-O-C}}$ nyúlás	1750	Csökken
1595	$\gamma_{\text{C-C}}$ nyúlás	1000	Csökken
1651	Karbonil (C=O)	250	Kismértékben nő

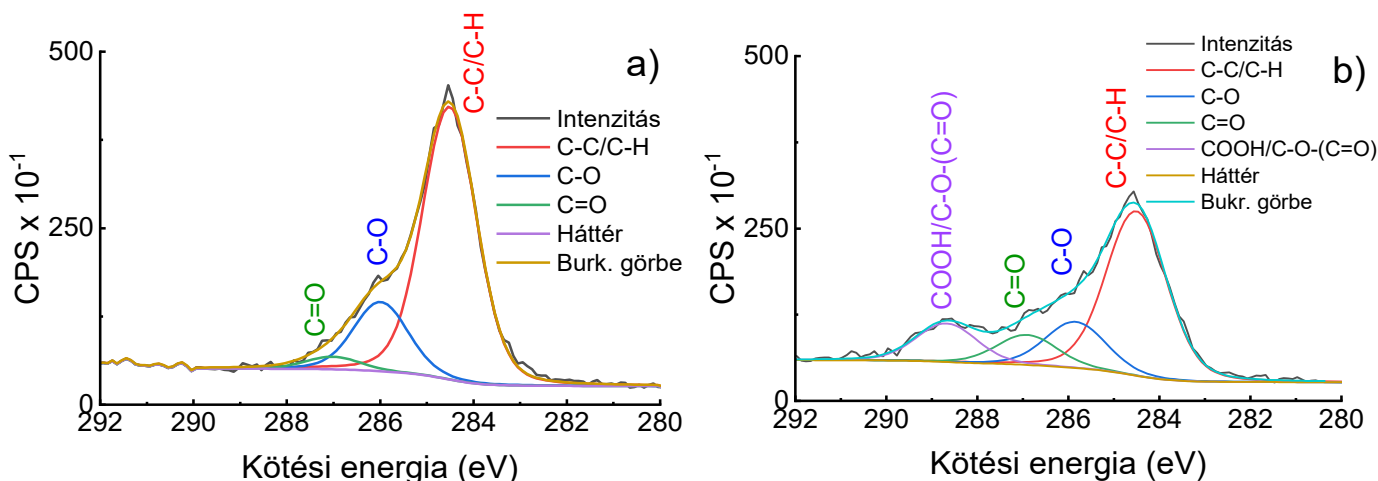
12. táblázat Az FTIR-spektrum változásai UV-kezelés hatására [142,143]

Hullámszám (cm ⁻¹)	Kötési típus	Abszorbancia (a.u.)	Csúcsintenzitás változása UV-kezelés hatására
927-800	Aromás hidrogén C-H	0,3	Kismértékben csökken
1200-1100	Aromás hidrogén C-H	0,3	Kismértékben csökken
1100	Észter	0,1	Nő
1216	Éter C-O-C	0,3	Csökken
1487	Fenilcsoport	0,25	Csökken
1800-1650	Karbonil C=O	0,1	Kismértékben nő

A Raman-spektroszkópiai vizsgálatok a főbb csúcsok intenzitásának jelentős csökkenését mutatták, ami a PEEK felületén végbemenő, UV-indukált degradációra és oxidációra utal. Az ~1595 cm⁻¹-nél megfigyelt csökkenés a gyűrűfelnyílásra és új funkciós csoportok (pl. karbonil-, karboxilcsoportok) kialakulására utal a C=C kötések felhasadása révén. Az 1146 cm⁻¹-nél tapasztalt változások a polimer gerincében található C–O–C kötések felhasadását jelzik, ami lánchasadást és a molekulatömeg csökkenését eredményezheti, ezáltal rontva a termikus és mechanikai stabilitást. A ~825 cm⁻¹-nél megfigyelt C–H deformáció az aromás gyűrű módosulására vagy oxidációjára utal, míg a ~646 cm⁻¹-es sáv a gyűrű torzulását jelzi. A ~1650 cm⁻¹ környezetében, amely a karbonilcsoportokhoz köthető, nem volt jelentős változás megfigyelhető.

Az FTIR-spektrumokban jelentős intenzitásnövekedés volt tapasztalható ~1216 cm⁻¹-nél, ami eltérhet egyes irodalmi eredményektől. Mivel az FTIR nem képes megkülönböztetni a C–O–C kötésekben és a karboxil/karboxilát csoportokban található C–O kötések, ez a növekedés valószínűleg az átfedő jelek eredménye. A karbonil (C=O) tartományban megfigyelt változások oxidációs folyamatokra utalnak, amelyek a polimer gerinc mentén poláris funkciós csoportok (pl. karbonsavak, aldehidek, anhidridek) kialakulásához vezethetnek. Egyéb jelentős spektrális változás nem volt kimutatható.

A mért XPS-spektrumok az 25a) -b). ábrákon láthatók és a 13. táblázat-14. táblázatok, valamint a. 26-27 ábrák foglalják össze az eredményeket. Az 26-27. ábrákon a rögzített spektrumok háttérre és a különböző kötésekhez tartozó alspektrumok kerültek felbontásra.



25. ábra A kezeletlen és UV-kezelt PEEK minták C 1s XPS spektrumai és azok felbontása. a) A kezeletlen PEEK minta mért C 1s spektruma (fekete vonal), valamint annak felbontása háttérre és a különböző kötések reprezentáló alspektrumokra (kék, zöld és piros színekkel jelölve), továbbá ezek burkológörbéje (barna vonal). b) A 33 J/cm^2 fajlagos besugárzási energiával, 110 mW/cm^2 fajlagos intenzitású UV-kezelésnek kitett PEEK minta mért C 1s spektruma (fekete vonal), valamint annak felbontása háttérre és a különböző kötések reprezentáló alspektrumokra (bíbor, kék, zöld és piros színekkel jelölve), valamint ezek burkológörbéje (türkiz vonal).

A C–C/C–H arány jelentős csökkenése az aromás szerkezet degradációjára utal, például gyűrűfelnyílásra és fragmentációra. A C–O arány enyhe változása valószínűleg az eredeti éterkötések (C–O–C) részleges bomlását tükrözi a PEEK-ben. Ugyanakkor új C–O kötések (pl. alkoholos vagy karboxil jellegűek) is kialakulhatnak, amelyek kompenzálják az intenzitásváltozást, így nem figyelhető meg jelentős csökkenés. A karbonsav/karboxilát csoportok (O–C=O) megjelenése felülethez kötött karboxil funkciós csoportok –COOH (karbonsav) vagy –COO[–] (karboxilát, pl. só formájában vagy disszociált állapotban) kialakulását jelzi. 33 J/cm^2 fajlagos UV-dózis és 110 mW/cm^2 intenzitás mellett a felületi oxigénkoncentráció megközelítette a $\sim 30 \text{ at\%}$ -ot, ami az oxidáció telítődési tartományának kezdetére utal ezen besugárzási körülmények között [102–104]. Ezt követően, azonos intenzitás mellett, további UV-kezelés várhatóan nem növeli számottevően a mérhető felületi oxigéntartalmat az XPS kimutatási határain belül.

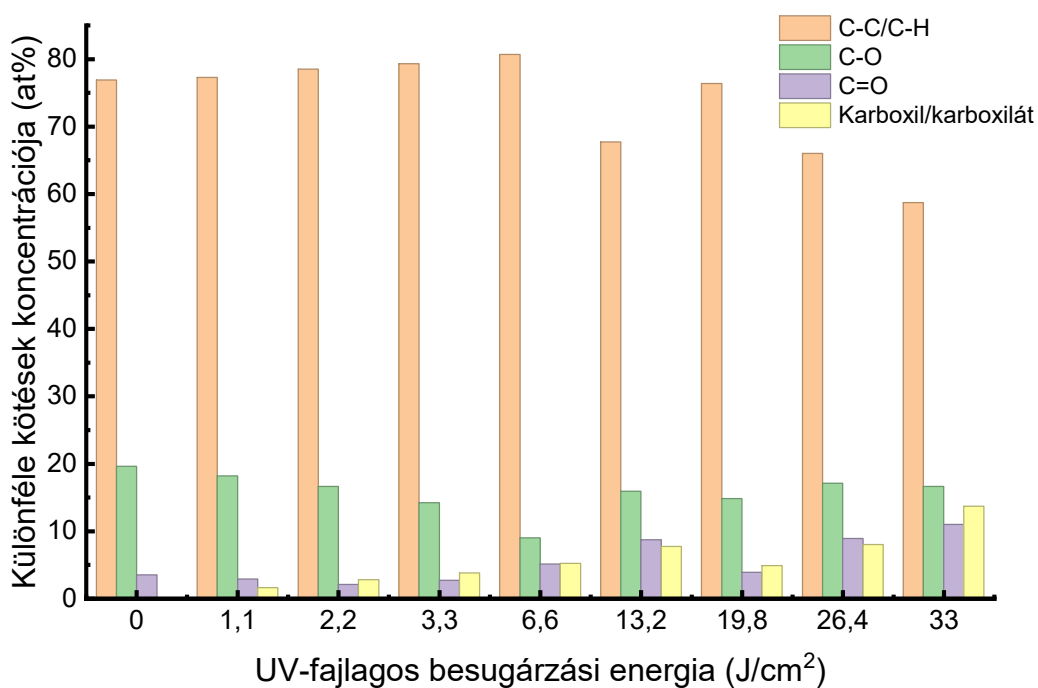
13. táblázat A PEEK minták felületi elemi összetétele (atom%) különböző UV-besugárzási fajlagos energiák (J/cm^2) és fajlagos intenzitások (mW/cm^2) esetén.

Minta [J/cm^2 / mW/cm^2]	C at%	O at%
Ref.	85,6	14,4
1.10 / 110	86,2	13,8
2.20 / 110	88,1	11,9
3.30 / 110	88,6	11,4
6.60 / 110	84,7	15,3
13.2 / 110	80,5	19,5
19.8 / 110	82,8	17,2
26.4 / 110	82,8	17,2
33.0 / 110	69,5	30,5
33.0 / 70	77,4	22,6
33.0 / 50	88,4	11,6

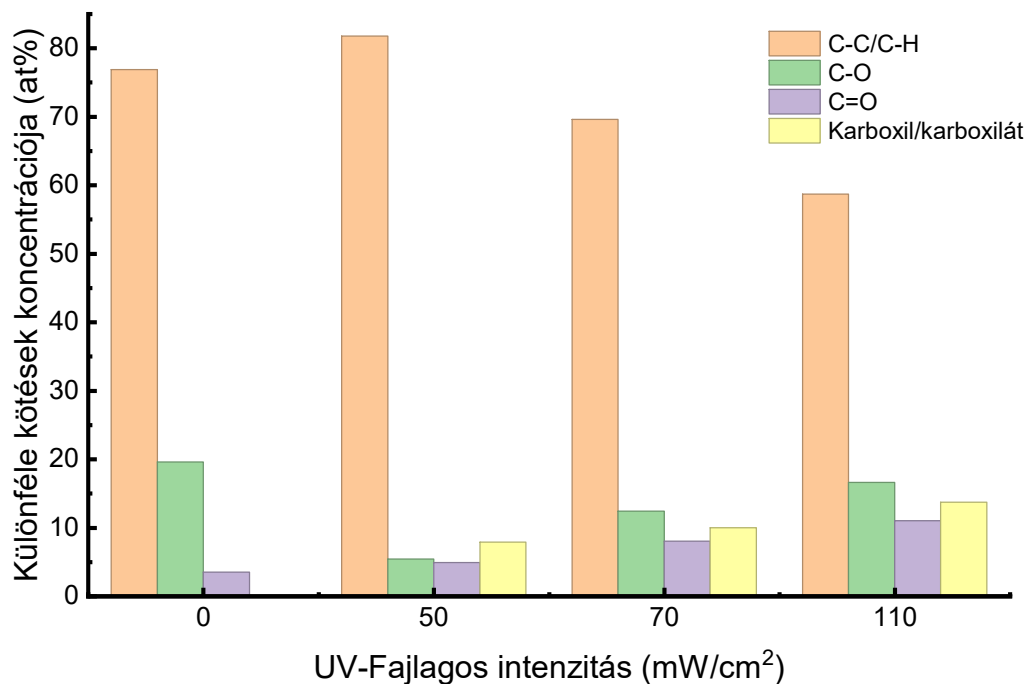
A 12. táblázat és a 22. ábra alapján jelentős különbségek figyelhetők meg az XPS-spektrumokban. A C–C/C–H kötések atomos arányának ~28%-os csökkenése fordított arányosságot mutat jelez az UV-intenzitás és az aromás szerkezet épsége között, ami lánchasadásra és gyűrűfelnylásra utal a PEEK-ben. Ezzel szemben a poláris funkciók csoportok – például karbonil- és karboxilcsoportok – képződése pozitívan korrelál az UV-intenzitással, ami progresszív felületi oxidációt jelez. Ebből az következik, hogy minél intenzívebb az UV-kezelés, annál erőteljesebb a felületi oxidáció (nagyon alacsony fajlagos energia és intenzitás esetén gyakorlatilag nem figyelhető meg oxidáció). A PEEK UV-indukált fotodegradációs és oxidációs folyamatait bemutató egyszerűsített sematikus ábra a 28. ábrán látható, szemléltetve az FTIR, Raman és XPS módszerekkel kimutatott oxigéntartalmú funkciók csoportok kialakulását.

14. táblázat A különböző kémiai kötésekben lévő szén aránya (atom%) különböző UV-fajlagos besugárzási energiák (J/cm^2) és fajlagos intenzitások (mW/cm^2) esetén.

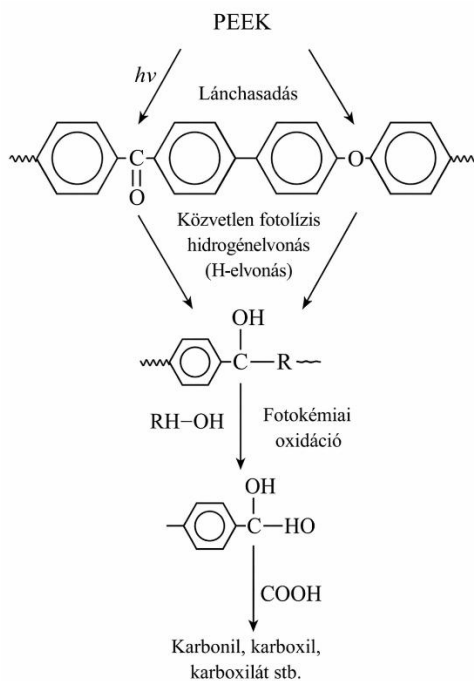
Minta [J/cm^2 / mW/cm^2]	C-C/C-H at%	C-O at%	C=O at%	Karboxil/Karboxilát at%
Ref.	76.9	19.6	3.5	0.0
1.10 / 110	77.3	18.2	2.9	1.6
2.20 / 110	78.5	16.6	2.1	2.8
3.30 / 110	79.3	14.2	2.7	3.8
6.60 / 110	80.7	9.0	5.1	5.2
13.2 / 110	67.7	15.9	8.7	7.7
19.8 / 110	76.4	14.8	3.9	4.9
26.4 / 110	66.0	17.1	8.9	8.0
33.0 / 110	58.7	16.6	11.0	13.7
33.0 / 70	69.6	12.4	8.0	10.0
33.0 / 50	81.8	5.4	4.9	7.9



26. ábra A PEEK felületén kialakuló különböző szén- és oxigénkötések koncentrációi 110 mW/cm^2 intenzitású UV-kezelés hatására.

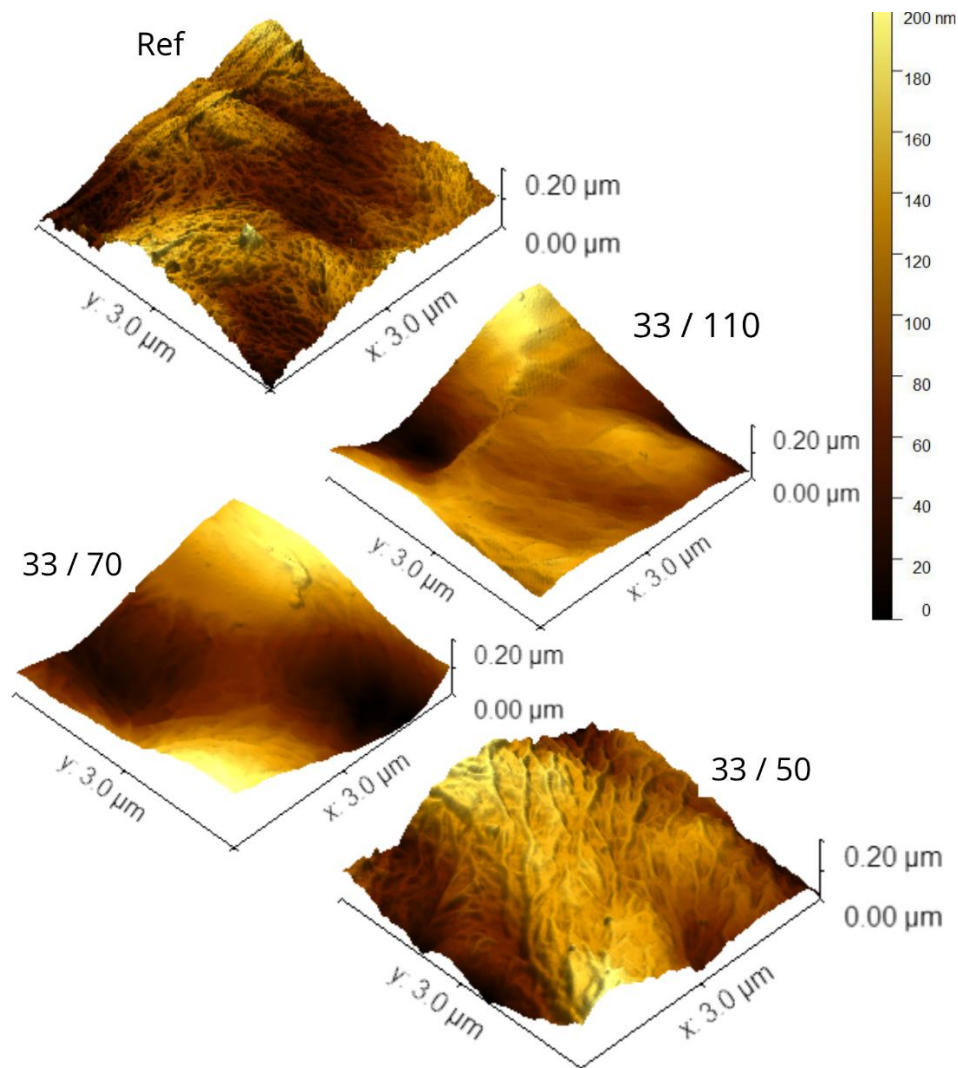


27. ábra A PEEK felületén kialakuló különböző szén- és oxigénkötések koncentrációja a különböző UV-kezelési intenzitások függvényében, 33 J/cm² UV-besugárzási fajlagos energia mellett.



28. ábra A PEEK UV-indukált fotodegradációjának sematikus ábrája (Giancaterina és mtsai [101] alapján), kiemelve a fő felületi reakciókat – kötésszakadást és az azt követő oxidációt –, amelyek az FTIR-, Raman- és XPS-vizsgálatokkal kimutatott oxigéntartalmú funkcionális csoportok kialakulásához vezetnek.

A felületi szerkezet változásai a 29. ábrán láthatók. A kezeletlen mintákon mikro- és nano-felületi érdesség egyaránt megfigyelhető volt. UV-kezelés hatására szubmikronos léptékben az érdesség eltűnt, ami a felület topográfiájának enyhe kisimulására utal. Ez a hatás azonban a felületi érdesség kvantitatív mérésével nem volt egyértelműen igazolható. A gyártás során kialakuló felületi hullámosság (pl. szerszámnyomok következtében) miatt a nano-csatornák eltűnése nem volt megbízhatóan kimutatható. A felületi érdességi paraméterek a mérési helytől függően jelentős szórást mutattak, és az erőteljes szűrés torzította volna a valós topográfiát. Ennek következtében az AFM-vizsgálatok nem szolgáltatottak konzisztens kvantitatív trendet, ugyanakkor a felvételek egyértelműen jelzik, hogy UV-kezelés hatására a felület nano-érdessége enyhén simábbá vált.



29. ábra A PEEK minták felületi morfológiája különböző UV- fajlagos besugárzási energia/intenzitás ($J/cm^2 / mW/cm^2$) értékek mellett; a képek jelölése: Ref. (referencia minta), 33/110, 33/70 és 33/50, amelyek a megfelelő fajlagos energia/intenzitás értékeknek felelnek meg.

Az intenzitásfüggő szerkezeti változások vizsgálata során jól elkülöníthető különbségek mutatkoztak. A korábban említett nanoérdesség magasabb UV-intenzitások (110 és 70 mW/cm²) esetén teljes mértékben eltűnt, míg alacsonyabb intenzitásnál (50 mW/cm²) jól látható és lényegében változatlan maradt.

Bár nagy intenzitású UV-kezelés után a nanoméretű struktúrák vizuálisan csökkentek, a kvantitatív érdességi trendek hiánya nem teszi lehetővé, hogy a javuló gyantapenetrációt közvetlenül kizárólag morfológiai hatásoknak tulajdonítsuk.

3A Tézis: Megvizsgáltam az UV-kezelés során kialakuló felületi hőmérsékletet, és kimutattam, hogy a legnagyobb alkalmazott intenzitás 110 mW/cm² mellett is a mért hőmérséklet (~170 °C) a PEEK térfogati termikus degradációjához tartozó tartomány alatt marad (≥220 °C az IEC 60085 [140] szerint). Ennek alapján megállapítottam, hogy a vizsgált felületi módosulások elsődlegesen UV-indukált fotokémiai oxidációhoz köthetők, így a vizsgálatok döntően a felületi hatások elemzésére korlátozódnak.

3B Tézis: Kimutattam, hogy UV-kezelés hatására a PEEK felületén oxidációs és fotodegradációs folyamatok indulnak meg, amelyek során oxigéntartalmú poláris funkciós csoportok – elsősorban karbonil- (C=O), karboxil- (-COOH/-COO⁻), valamint C-O típusú kötések – alakulnak ki az aromás szerkezet részleges felnyílása és a polimer lánc hasadása mellett. Igazoltam, hogy 33 J/cm² fajlagos besugárzási értékig ezen vegyületek értéke növekszik, 11 at% (C=O) és 13,7 at% (-COOH/-COO⁻) értékekig. Igazoltam, hogy ezek a változások több analitikai módszerrel is detektálhatók (a Raman-spektroszkópia az aromás gyűrűk degradációját és a kötésszerkezet átalakulását mutatta ki, az FTIR-mérések az oxigéntartalmú funkciós csoportok megjelenését jelezték, míg az XPS-analízis kvantitatívan is igazolta a felületi oxidációt és az új funkciós csoportok kialakulását).

3C Tézis: Megállapítottam, hogy az UV-kezelés hatására a PEEK felület nano-topográfiája módosul, és magasabb intenzitások esetén a szubmikronos érdesség csökkenése, illetve a felület enyhe kisimulása figyelhető meg. Kimutattam továbbá, hogy bár a morfológiai változások kvalitatív módon egyértelműen azonosíthatók AFM-vizsgálatokkal, a kvantitatív érdességi paraméterek nem mutatnak konzisztens trendet. Ennek alapján igazoltam, hogy a javuló gyantapenetráció nem magyarázható kizárólag a felületi morfológia változásával, hanem abban más, elsősorban kémiai hatások játszanak meghatározó szerepet.

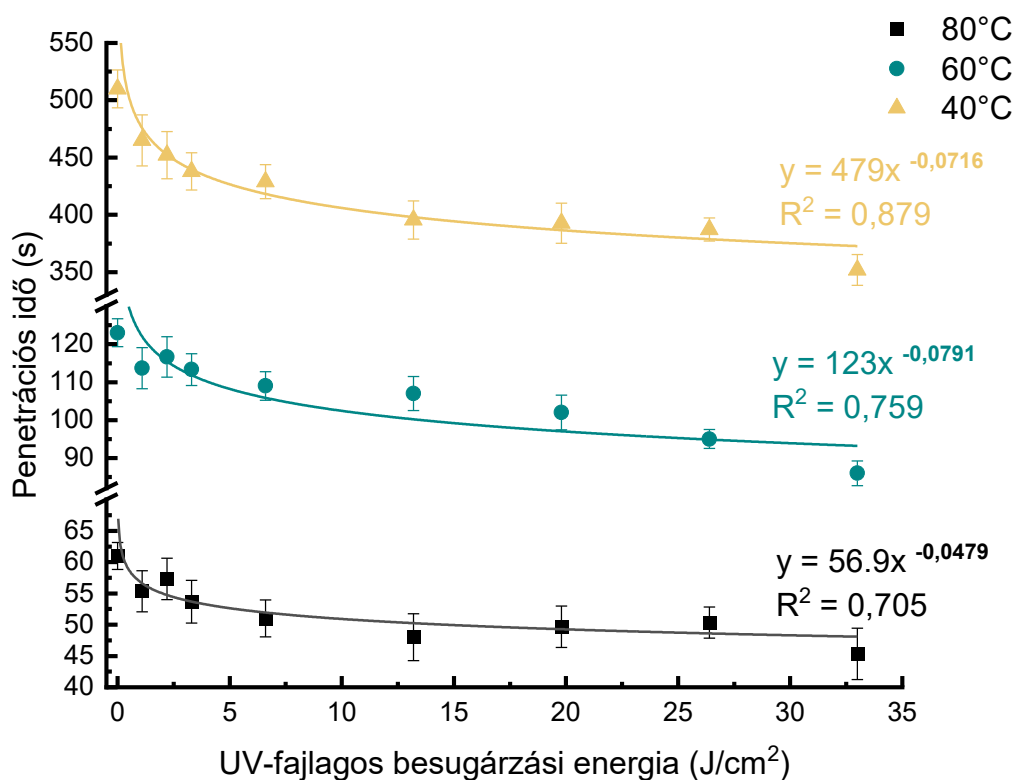
6.3.2. Penetrációs kinetika változása UV hatására

A penetrációs kísérletek eredményeit a 15. táblázat foglalja össze, és a 30. ábra szemlélteti. A penetrációs időmérések pontossága ± 1 s volt.

15. táblázat Az impregnáló gyanta penetrációs idejei (s) a penetrációs hosszintervallum (mm) függvényében két, azonos UV-kezelésnek kitett rézvezető közötti térben, állandó (110 mW/cm²) fajlagos intenzitás mellett.

T, °C	x, mm	UV-fajlagosbesugárzási energia, J/cm ²								
		Ref.	1,1	2,2	3,3	6,6	13,2	19,8	26,4	33,0
80	0 - 19.0	7	7	8	6	6	6	5	5	5
	19.0 - 26.8	6	6	6	6	5	5	5	6	4
	26.8 - 30.0	6	6	6	5	4	5	6	5	4
	30.0 - 32.9	3	4	4	3	3	3	3	3	3
	32.9 - 37.9	6	5	6	6	5	6	5	5	5
	37.9 - 42.4	6	6	5	5	6	5	5	5	4
	42.4 - 46.5	6	5	5	5	5	4	5	5	5
	46.5 - 50.2	5	5	4	4	4	4	5	4	4
	50.2 - 53.7	6	4	4	4	5	3	4	4	4
	53.7 - 56.9	5	4	4	5	4	4	4	4	4
	56.9 - 60.0	4	4	5	4	4	3	3	4	4
	Össz, s	61	55	57	54	51	48	50	50	45
60	0 - 19.0	12	11	12	12	11	11	10	10	9
	19.0 - 26.8	11	11	13	12	11	10	10	9	7
	26.8 - 30.0	11	10	12	12	11	11	10	9	8
	30.0 - 32.9	10	10	8	8	7	7	7	6	5
	32.9 - 37.9	10	10	9	11	10	10	10	9	8
	37.9 - 42.4	12	11	10	10	10	10	9	9	8
	42.4 - 46.5	10	11	9	9	9	9	8	9	8
	46.5 - 50.2	11	12	10	10	10	10	9	9	8
	50.2 - 53.7	11	10	10	11	10	10	9	9	8
	53.7 - 56.9	10	10	11	10	10	9	10	8	8
	56.9 - 60.0	10	10	10	10	9	9	10	9	8
	Össz., s	118	117	114	113	109	107	102	95	86

T, °C	x, mm	UV-fajlagosbesugárzási energia, J/cm ²								
		Ref.	1,1	2,2	3,3	6,6	13,2	19,8	26,4	33,0
40	0 - 19.0	48	45	44	45	36	32	37	39	28
	19.0 - 26.8	39	40	45	41	41	39	36	36	34
	26.8 - 30.0	49	37	43	38	36	37	32	37	26
	30.0 - 32.9	47	43	41	41	39	38	35	35	34
	32.9 - 37.9	43	44	44	38	39	38	34	33	26
	37.9 - 42.4	44	47	41	40	45	33	38	33	34
	42.4 - 46.5	49	46	40	39	38	36	40	38	34
	46.5 - 50.2	45	46	37	39	36	38	36	35	30
	50.2 - 53.7	49	37	40	40	43	39	41	39	36
	53.7 - 56.9	50	43	39	36	38	31	33	29	34
	56.9 - 60.0	47	37	38	41	38	35	31	33	36
	Össz., s	510	465	452	438	429	396	393	387	352



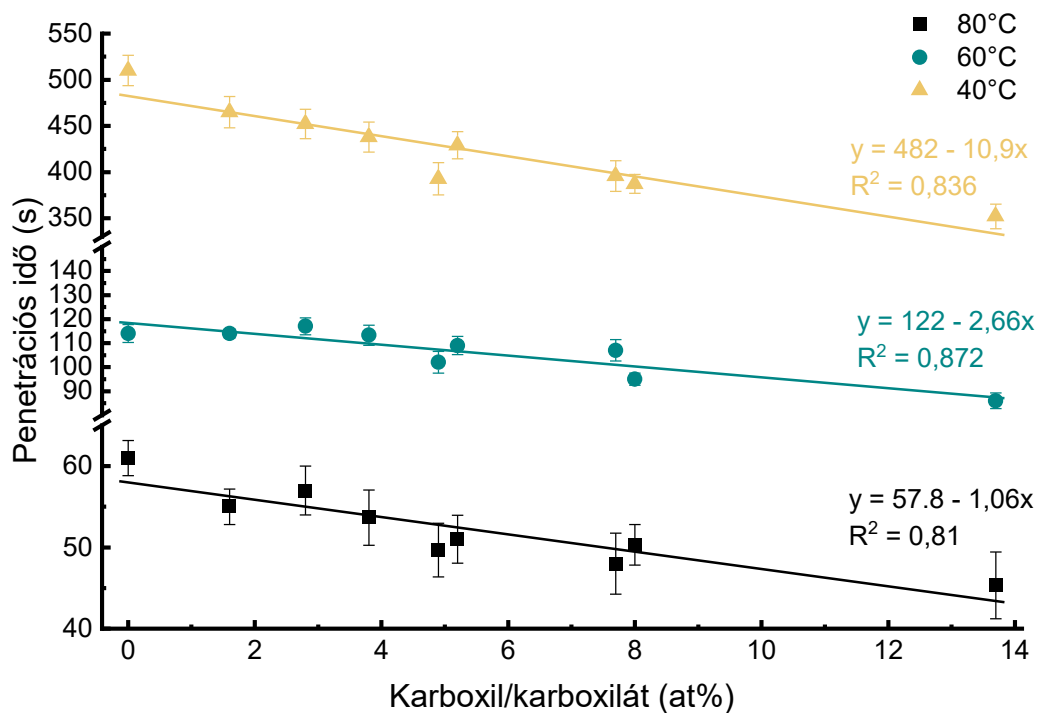
30. ábra A mért penetrációs idők különböző hőmérsékleteken az UV-fajlagos besugárzás energiájának függvényében, 110 mW/cm² intenzitás mellett (az adatok az 15. táblázat Össz. sorából származnak).

A mérések alapján egyértelmű fordított kapcsolat figyelhető meg az UV- fajlagos besugárzás energiája és a teljes penetrációs idő között minden vizsgált hőmérsékleten. A fajlagos energia 33 J/cm^2 -ig történő növelésével a teljes penetrációs idő következetesen csökkent, ami azt jelzi, hogy a nagyobb UV-basugárzás jelentősen felgyorsítja a gyanta penetrációját a PEEK felületek között. Ez a tendencia arra utal, hogy az UV-kezelés hatására kialakuló felületi oxidáció és esetleges szerkezeti változások javítják a felületek nedvesítését és csökkentik az áramlási ellenállást.

4A Tézis: Kimutattam, hogy az UV-kezelés fajlagos energiájának növelésével a teljes penetrációs idő minden vizsgált hőmérsékleten monoton módon csökken. Igazoltam, hogy 33 J/cm^2 -ig növelt fajlagos besugárzás esetén a gyantapenetráció jelentősen felgyorsul, ami arra utal, hogy az UV-indukált felületi módosulások – elsősorban az oxidáció – meghatározó szerepet játszanak a penetráció kinetikájának javításában.

6.3.3. Oxidáció és penetráció kapcsolata

A különböző oxidtartalmú vegyületek hatása a penetrációs időre a 31. ábrán látható. Az ábra alapján a karboxil/karboxilát csoportok atomszázalékainak növekedése minden vizsgált hőmérsékleten a penetrációs idő folyamatos csökkenésével jár. Ez a csökkenés elsősorban az UV- fajlagos besugárzás energiájától függ, és kevésbé a hőmérséklettől; minél hosszabb az UV-kezelés, annál nagyobb mértékben javul a gyanta penetrációja. A legnagyobb csökkenés (-31%) $40 \text{ }^\circ\text{C}$ -on volt megfigyelhető, míg $60 \text{ }^\circ\text{C}$ -on ($-24,5\%$) és $80 \text{ }^\circ\text{C}$ -on ($-26,2\%$) valamivel kisebb, de hasonló mértékű csökkenések adódtak. Minden esetben a legkisebb penetrációs idők a legnagyobb UV- fajlagos besugárzási energiák mellett jelentkeztek, ami megerősíti, hogy az UV-indukált felületi oxidáció domináns szerepet játszik az penetrációs folyamatban.



31. ábra A PEEK felületén lévő karboxil- és karboxilátkötések koncentrációjának (at%) hatása az epoxi impregnálóyanta penetrációs idejére.

A korábban levezetett téglalap keresztmetszetű kapilláris modell (15c, 16e) egyenletei szerint a penetráció kinetikája az alábbi összefüggéssel írható le:

$$x^2 \propto \frac{d}{3 \cdot \eta} \cdot \sigma_{lg} \cdot \cos \theta_r \cdot t$$

ami azt jelzi, hogy a folyamatot alapvetően a határfelületi tag, azaz a $\sigma_{lg} \cdot \cos \theta_r$ szorzat határozza meg. Ennek megfelelően az UV-indukált oxidáció – a PEEK felület polaritásának növelésével – várhatóan csökkenti a peremszöget, és növeli a kapilláris hajtóerőt, ami magyarázatot ad a kísérletileg megfigyelt gyorsabb penetrációra. Bár a peremszög közvetlen mérése ebben a vizsgálatban nem történt meg, a felületi oxigénkoncentráció és a penetrációs kinetika közötti egyértelmű korreláció indirekt módon alátámasztja a határfelületi energia módosulását, összhangban a kapilláriselmélettel.

4B Tézis: Kimutattam, hogy a PEEK felületén kialakuló karboxil/karboxilát csoportok koncentrációjának növekedése minden vizsgált hőmérsékleten a penetrációs idő csökkenésével jár, és a hatás mértékét elsősorban az UV-besugárzás fajlagos energiája határozza meg. A penetrációs idő maximális csökkenése a -30% körül alakult 13,7 at% karboxil/karboxilát koncentráció mellett. A korábban levezetett kapilláris modell alapján a penetráció gyorsulása valószínűsíthetően a határfelületi tag, vagyis a $\sigma_{lg} \cdot \cos\theta_r$ szorzat módosulásával hozható összefüggésbe, amelyet az UV-indukált felületi oxidáció és a felületi polaritás növekedése indirekt módon alátámaszt.

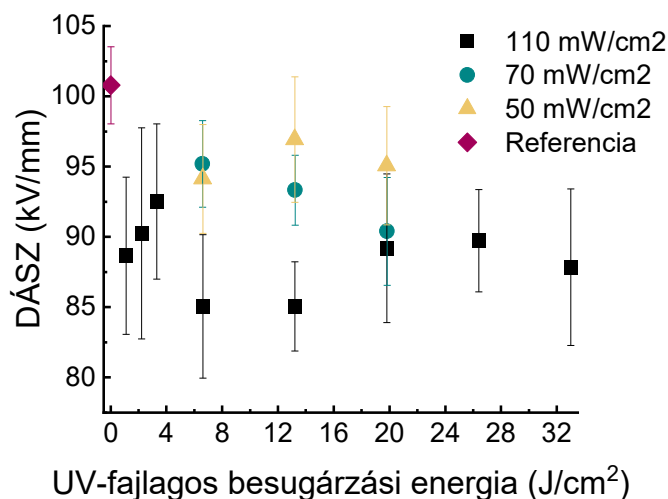
6.3.4. Dielektromos átütési szilárdság

A dielektromos átütési szilárdság mérési eredményeit a 16. táblázat foglalja össze, és a 32-34. ábrák szemléltetik.

16. táblázat Öt párhuzamos dielektromos átütési szilárdság mérés eredményei (kV/mm) 0,15 mm bevonatvastagság esetén, különböző UV- fajlagos intenzitások (mW/cm²) és fajlagos besugárzási energiák (J/cm²) mellett.

mW/cm ²	J/cm ²	1.	2.	3.	4.	5.
Ref	0	97,3	98,7	100	104	104
110	1,1	79,3	87,3	90	90	96,7
	2,2	76	90	94	94	97,3
	3,3	83,3	90	93,3	97,3	98,7
	6,6	79,3	81,3	84	86,7	94
	13,2	80	83,3	86	86,7	89,3
	19,8	81,3	84,7	92	92,7	95,3
	26,4	84,7	86	92	92,7	93,3
	33	78	88,7	88,7	88,7	95,3
70	6,6	90,7	94	94,7	96,7	100
	13,2	90	92	92,7	94,7	97,3
	19,8	86,7	86,7	89,3	92,7	96,7
50	6,6	90	90	94	96,7	100
	13,2	89,3	96,7	97,3	98	103
	19,8	89,3	90,7	97,3	98,7	99,3

A 32. ábra alapján megállapítható, hogy az UV-besugárzás jelentősen csökkenti a PEEK szigetelés dielektromos átütési szilárdságát. A kezdeti, 101 kV/mm értékű átütési szilárdság már 1,1 J/cm² besugárzási dózis hatására 88,7 kV/mm-re (-12%) csökkent. Ez a hirtelen kezdeti csökkenés küszöbszerű viselkedésre utal már alacsony besugárzási dózisonál. Ugyanakkor a besugárzási energia további növelése nem eredményezett jelentős további romlást az értékekben.



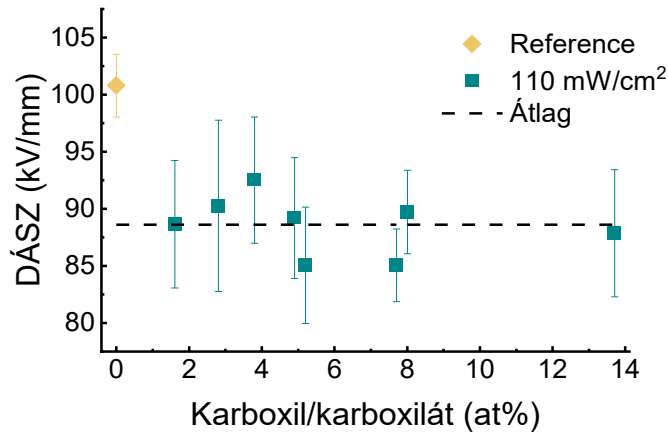
32. ábra Az UV-kezelés hatása a PEEK dielektromos átütési szilárdságára a fajlagos besugárzás energiájának függvényében (a rombusz jelölők a referencia mintát, a négyzetek a 110 mW/cm², a körök a 70 mW/cm², a háromszögek pedig az 50 mW/cm² fajlagos intenzitásokat jelölik; különböző besugárzási teljesítmények esetén, az értékek az ábrán láthatók).

A 33. ábra azt mutatja, hogy a dielektromos átütési szilárdság nem arányos a felületen kialakuló karboxil- és karboxilátcsoportok atomos arányával. Már a legalacsonyabb karboxil/karboxilát koncentráció mellett is jelentős csökkenés figyelhető meg az átütési szilárdságban. Ez arra utal, hogy a felületi oxidáció kezdeti szakasza már módosítja a felületi elektromos tulajdonságokat, és nem egyszerű koncentrációfüggő viselkedésről van szó. Az UV-kezelés eredményeként az átlagos dielektromos átütési szilárdság 88,6 kV/mm körül alakult, függetlenül a karboxil/karboxilát csoportok koncentrációjától. Ez a viselkedés a felület által meghatározott átütési mechanizmust támasztja alá, amelyben az elektromosan kritikus állapot már alacsony oxidációs szinteken kialakul, és a megfigyelt küszöbszerű viselkedéshez vezet.

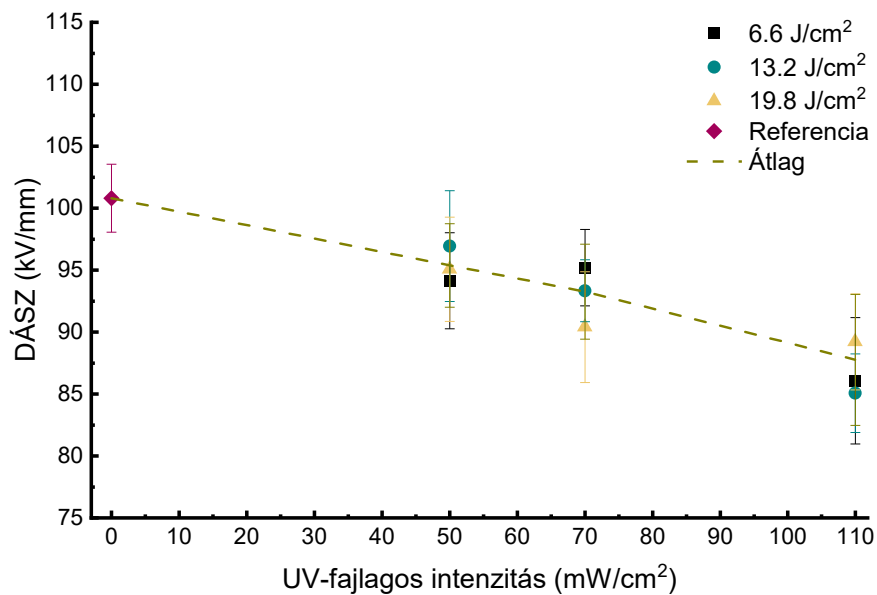
A poláris, oxigéntartalmú funkciók megjelenése növelheti a felület lokális dipólussűrűségét, valamint töltéscsapdák kialakulását eredményezheti a felülethez közeli tartományban. Ezek az elektromosan aktív helyek elősegíthetik a töltésfelhalmozódást és

lokálisan az elektromostér erősödését eredményezik, ezáltal előidézve a korábbi átütést még jelentős térfogati degradáció hiányában is. Meg kell jegyezni továbbá, hogy az dielektromos átütés vizsgálatok csapvízben történtek, így a kapott értékek az UV-indukált felületi oxidáció és az ionos mérési közeg együttes hatását tükrözik.

Ezzel szemben a 34. ábra egyértelmű fordított kapcsolatot mutat a dielektromos átütési szilárdság és a fajlagos besugárzás intenzitása között.



33. ábra A karboxil- és karboxilátcsoportok koncentrációjának hatása a 110 mW/cm² fajlagos intenzitással kezelt PEEK dielektromos átütési szilárdságára különböző UV-fajlagos besugárzási energiák mellett (a rombusz jelölők a referencia mintát jelölik, lásd a 16. táblázatban).

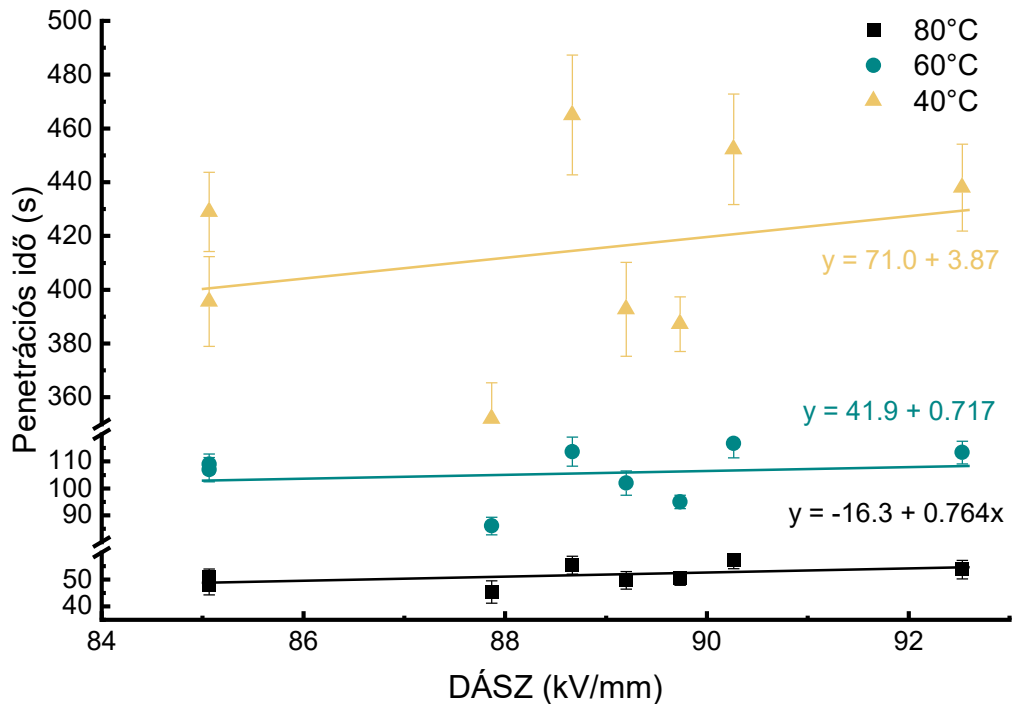


34. ábra Az UV-besugárzás fajlagos intenzitásának hatása a PEEK dielektromos átütési szilárdságára.

5A Tézis: *Kimutattam, hogy az UV-besugárzás a PEEK szigetelés dielektromos átütési szilárdságát már alacsony fajlagos besugárzási energiánál is jelentősen csökkenti, és a folyamat küszöbszerű viselkedést mutat. Megállapítottam, hogy az UV-kezelés hatására a kezdeti 101 kV/mm átütési szilárdság lecsökkent 88,6 kV/mm átlagos értékre. Megállapítottam, hogy az átütési szilárdság csökkenése nem arányos a felületen kialakuló karboxil/karboxilát csoportok koncentrációjával, hanem már alacsony oxidációs szinten bekövetkezik, majd magasabb besugárzási energiák esetén közel állandó értéken stabilizálódik. A jelenség hátterében a felületi oxidáció következtében kialakuló poláris funkciós csoportokhoz köthető töltéscsapdák és lokális elektromos térerősödés állhat, amely felület vezérelt átütési mechanizmust eredményez. Kimutattam továbbá, hogy az átütési szilárdság csökkenése fordított kapcsolatot mutat az UV-kezelés fajlagos intenzitásával.*

6.3.5. A komplex analízis

A penetrációs kinetika javulása és a dielektromos szilárdság közötti kompromisszum kvantitatív ábrázolása a 35. ábrán látható. A 35. ábra alapján megállapítható, hogy a penetrációs idő csökkenése a dielektromos átütési szilárdság romlásával jár együtt, ami egyértelmű, nemlineáris egymással ellentétes hatások közötti kompromisszum kapcsolatot jelez a két tulajdonság között. Ez arra utal, hogy az UV-indukált felületi oxidáció egyszerre növeli a határfelületi kapilláris hajtóerőt és csökkenti a felület elektromos szigetelő képességét, így a penetráció hatékonyság javulása a szigetelési teljesítmény rovására történik. A lineáris trendvonalak kizárólag a szemléltetést szolgálják.



35. ábra A penetrációs idő és a dielektromos átütési szilárdság kapcsolata különböző hőmérsékleteken, 110 mW/cm² fajlagos UV-intenzitás mellett.

A gyakorlati alkalmazás szempontjából az UV-kezelés bevezetése mérnöki kompromisszumot igényel. Bár a javuló penetrációs kinetika révén csökkenthető a technológiai idő és ezáltal a gyártási költség, a dielektromos átütési szilárdság csökkenése, valamint a részkisülések kezdeti feszültségének esetleges mérséklődése a szigetelőrendszer megbízhatóságát veszélyeztetheti. Ennek alapján a technológia alkalmazása inkább nagyobb méretű, alacsonyabb villamos térerősségű rendszerek esetén kedvező, míg kompakt, nagyfeszültségű járműipari alkalmazásokban korlátozott lehet.

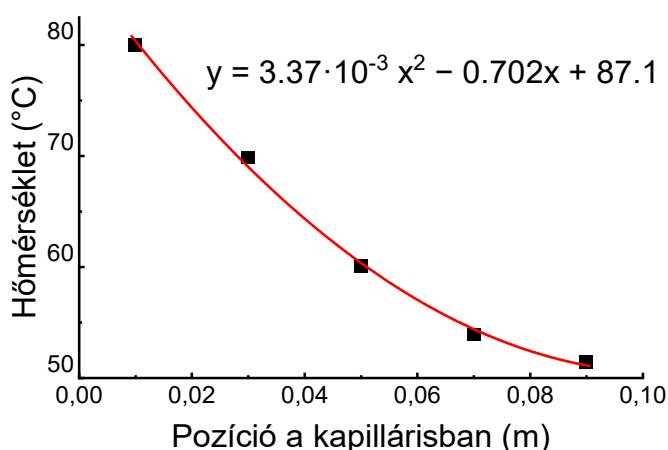
5B Tézis: Az UV-kezelés technológiai alkalmazása a szigetelési követelmények által meghatározott korlátok mentén optimalizálandó. Kimutattam, hogy az UV-kezelés hatására a penetrációs kinetika javulása és a dielektromos átütési szilárdság csökkenése között nemlineáris, ellentétes irányú kapcsolat áll fenn. Igazoltam, hogy az UV-indukált felületi oxidáció egyidejűleg növeli a határfelületi kapilláris hajtóerőt és rontja a szigetelő tulajdonságokat, így a penetráció hatékonyságának növelése a dielektromos teljesítmény rovására történik. Ennek alapján megállapítottam, hogy az UV-kezelés alkalmazása mérnöki optimalizációt igényel, ahol az alkalmazható tartományt a penetrációs kinetika javulása és a szigetelési megbízhatóság közötti, alkalmazásfüggő kompromisszum határozza meg.

6.4. Hőmérséklet-gradiens hatása

A hőmérséklet-gradiens jelenléte alapvetően módosítja a kapilláris penetráció lefolyását, mivel a hőmérséklet térbeli változása nemcsak a termofizikai tulajdonságokat befolyásolja, hanem határfelületi energia változásához is vezet. Ennek következtében a klasszikus viszkózus–kapilláris egyensúly mellett további, határfelületi eredetű hajtóerők is megjelennek, amelyek jelentősen befolyásolják a penetráció dinamikáját. Az alábbiakban bemutatásra kerül, hogy a hőmérséklet-gradiens nagysága és iránya miként hat a penetrációs folyamatra, valamint a referencia értékektől való eltérésekre.

6.4.1. Hőmérsékleteloszlás és hőmérséklet gradiens

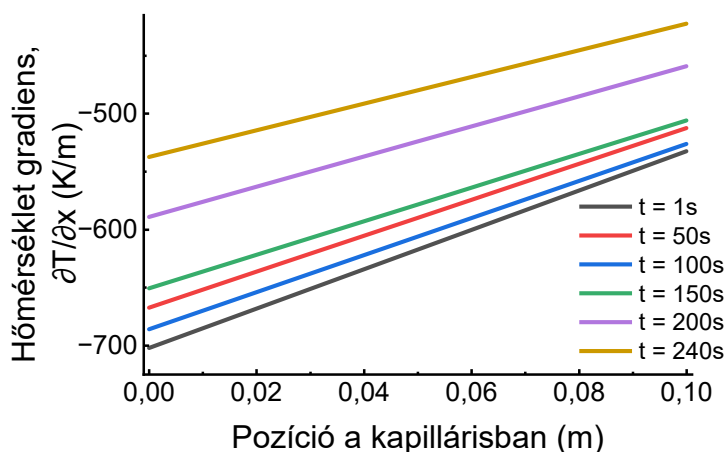
A kapilláris menti hőmérsékleteloszlás különböző időpontokban került meghatározásra a kísérletek során. Egy reprezentatív hőmérsékletprofil a 36. ábrán látható, ahol a kapilláris hossza mentén monoton hőmérsékletcsökkenés figyelhető meg, igazolva egy jól definiált hőmérséklet-gradiens jelenlétét. A mért adatok másodfokú polinomokkal lettek illesztve, amely lehetővé tette a lokális hőmérséklet-gradiens pontos meghatározását.



36. ábra A kapilláris menti hőmérsékleteloszlás $t = 1$ s időpillanatban az O-110–60 kísérlet során. A mért adatok másodfokú polinommal kerültek illesztésre, amely alapján a lokális hőmérséklet-gradiensek meghatározásra kerültek.

A hőmérsékletprofilokra illesztett függvények alapján a hőmérséklet-gradiens térbeli eloszlása deriválással került meghatározásra. Az így kapott gradiensértékek a 37. ábrán láthatók különböző időpontokban. Az ábra alapján a hőmérséklet-gradiens a kapilláris mentén szisztematikus térbeli változást mutat: a bemeneti szakasz közelében nagyobb értékek jellemzők, amelyek a kapilláris vége felé fokozatosan csökkennek. Ez arra utal, hogy a hőmérsékletmező térben nem homogén, így a hajtóerők is helyfüggőek.

A térbeli változás mellett a hőmérséklet-gradiens időbeli alakulása is megfigyelhető. Korai időpillanatokban (pl. $t = 1$ s) a gradiens nagyobb, míg későbbi időpontokban (pl. $t = 240$ s) a teljes kapilláris mentén csökken. Ez a viselkedés a rendszer fokozatos hőmérsékleti kiegyenlítődését tükrözi.



37. ábra A hőmérséklet-gradiens térbeli eloszlása a kapilláris mentén különböző időpontokban az O-110–60 kísérlet során. A gradiensek a mért hőmérsékletprofilokra illesztett polinomfüggvények deriválásával kerültek meghatározásra. A hőmérséklet-gradiens időben csökken.

A hőmérséklet-gradiens csökkenése közvetlen hatással van az áramlási viselkedésre. Mivel a Marangoni hajtóerő arányos a hőmérséklet-gradienssel, annak nagysága időben csökken. Emellett a gradiens térbeli változása azt jelenti, hogy a hajtóerő nem állandó a kapilláris mentén, hanem helyfüggő módon változik.

Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a hőmérséklet-gradiens térbeli eloszlását és időbeli alakulását egyaránt figyelembe kell venni a nem izoterm kapilláris áramlás elemzése során.

6.4.2. Penetrációs viselkedés hőmérséklet-gradiens jelenlétében

A penetráció dinamikájának kiértékelése elsőként a mért penetrációs idők és a penetrációs hossz kapcsolatának vizsgálatával történt. A nyers penetrációs időket a 17. táblázat-18. táblázatok rögzítik. Izoterm körülmények között a hőmérséklet növekedésével a penetrációs idő szisztematikus csökkenése volt megfigyelhető, ami a kapilláris mobilitás növekedésére utal. Ezzel szemben hőmérséklet-gradiens alkalmazása esetén nem monoton viselkedés jelentkezett, a penetrációs idők nem követtek egyértelmű trendet.

A megfelelő penetrációs görbék, a penetrációs hossz négyzetének idő függvényében ábrázolva, a 38. ábrán (nyitott kapilláris), illetve a 39. ábrán (zárt kapilláris) láthatók. Izoterm körülmények között (38a és 39a ábrák) a L^2 és t között lineáris kapcsolat figyelhető meg, amely összhangban áll a klasszikus Washburn-típusú penetrációval, és a viszkozitás által determinált folyamatra utal.

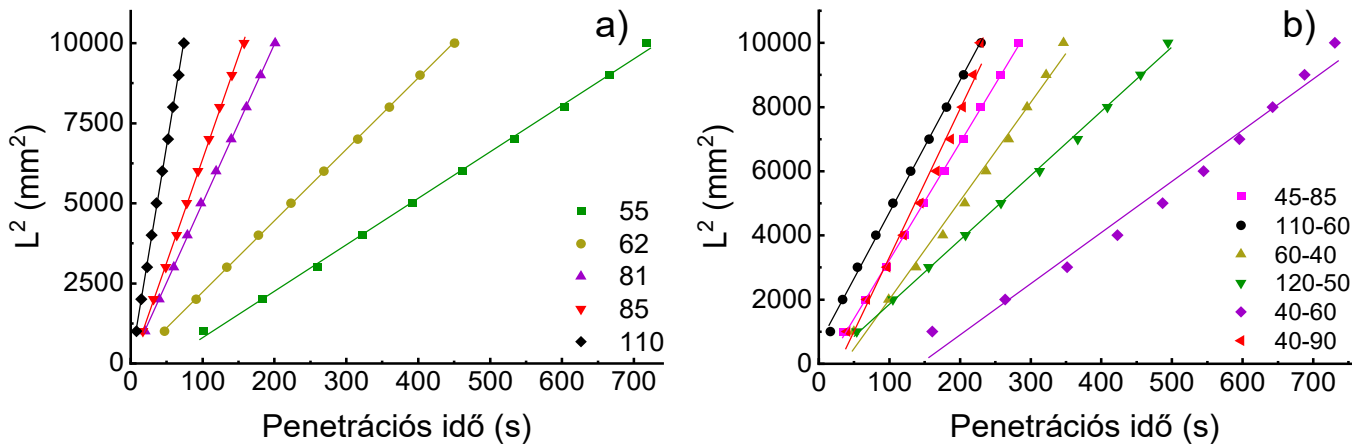
Ezzel szemben a nem izoterm esetekben (38b és 39b ábrák) a linearitástól való egyértelmű eltérés és nagyobb szórás figyelhető meg. Azonos vagy hasonló reprezentatív hőmérsékletek mellett is jelentősen eltérő penetrációs idők adódtak a különböző hőmérséklet-tartományok függvényében. Ez arra utal, hogy a penetrációs folyamat nem írható le egyetlen jellemző hőmérséklettel, és a gradiens által indukált hatásokat is figyelembe kell venni.

17. táblázat Nyers penetrációs idők (s) izoterm körülmények között, a kísérletek jelölése és a hőmérséklet (°C) feltüntetésével.

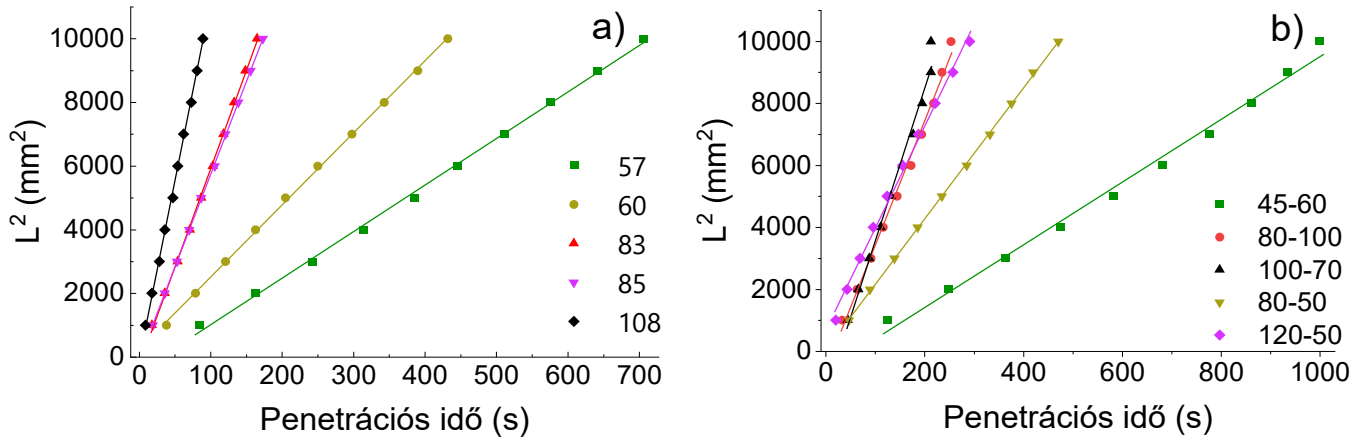
Penetrációs úthossz, mm	NY-55	NY-62	NY-81	NY-85	NY-110	Z-57	Z-60	Z-85	Z-83	Z-108
32	102	47	20	17	8	84	38	19	18	9
45	183	91	40	32	15	163	79	36	36	18
55	260	134	60	49	23	243	121	53	54	28
63	323	178	79	64	29	314	163	70	71	36
71	392	223	98	78	36	386	205	87	87	47
77	462	269	119	94	44	446	250	106	103	54
84	534	316	140	109	52	512	298	121	118	62
89	603	360	161	124	59	576	343	139	133	73
95	666	403	181	141	67	641	390	156	149	81
100	718	451	201	158	74	706	432	173	165	89

18. táblázat Nyers penetrációs idők (s) nem izoterm körülmények között, a kísérletek jelölése és a hőmérséklet tartományok (°C) feltüntetésével.

Penetrációs úthossz, mm	NY-40-85	NY-110-60	NY-60-40	NY-120-50	NY-40-60	NY-40-90	Z-45-60	Z-80-100	Z-100-70	Z-80-50	Z-120-50
32	36	16	50	54	161	40	124	33	44	47	20
45	67	34	99	105	264	68	248	63	66	89	43
55	95	55	138	156	352	97	364	91	88	139	69
63	122	81	176	208	423	120	474	116	111	186	96
71	148	105	207	258	487	144	582	144	132	235	124
77	179	130	237	313	545	167	682	172	155	285	155
84	205	156	269	367	596	187	776	194	177	332	187
89	229	181	295	409	643	204	861	218	195	376	221
95	257	205	322	456	688	219	935	235	213	420	257
100	283	230	347	495	731	229	1000	253	213	471	291



38. ábra A penetrációs hossz négyzetének időfüggése nyitott kapilláris esetén a) izoterm és b) nem izoterm körülmények között. Az egyes értékek izoterm hőmérsékleteket (°C), míg a tartományok hőmérséklet-intervallumokat (°C) jelölnek gradiens kísérletekben.



39. ábra A penetrációs hossz négyzetének időfüggése zárt kapilláris esetén a) izoterm és b) nem izoterm körülmények között. Az egyes értékek izoterm hőmérsékleteket (°C), míg a tartományok hőmérséklet-intervallumokat (°C) jelölnek gradiens kísérletekben.

6A Tézis: Kimutattam, hogy nem izoterm körülmények között a penetrációs hossz négyzete és az idő közötti kapcsolat eltér a lineáris viselkedéstől, ami arra utal, hogy a folyamat leírásához az izoterm modell nem elegendő.

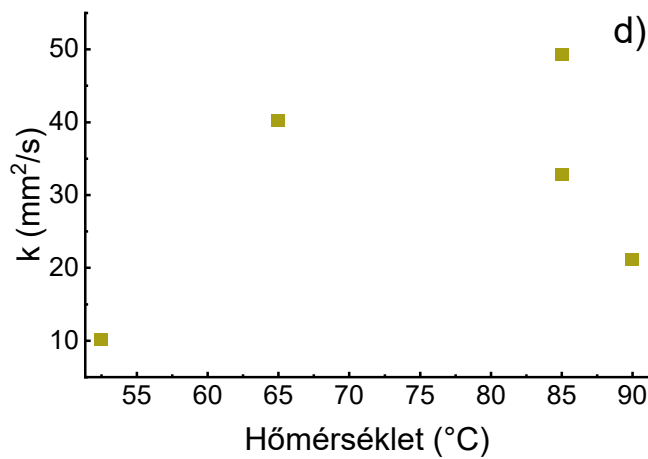
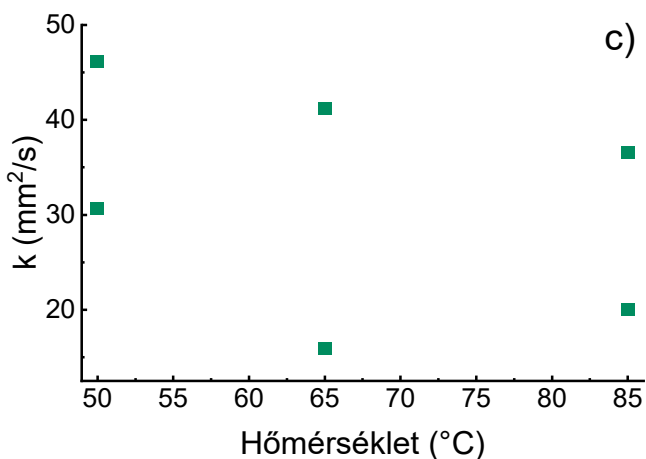
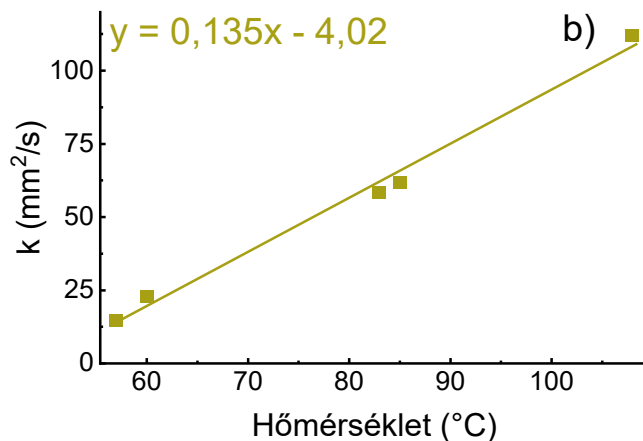
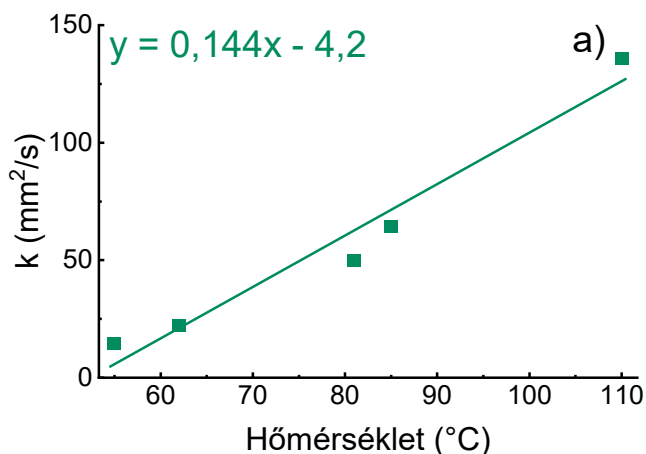
6.4.3. Mobilitási paraméter

A mobilitási paraméter hőmérsékletfüggése a 40a)-d). ábrákon látható, amelyek az izoterm és nem izoterm eseteket nyitott és zárt kapilláris konfigurációk mellett mutatják be. Izoterm körülmények között a mobilitási paraméter a hőmérséklet növekedésével szisztematikusan emelkedik, ami összhangban van a viszkozitás csökkenésével, és mindkét konfiguráció esetén közel lineáris összefüggést eredményez. A regressziós egyenesek illesztései a 40.a)-b) ábrákon láthatóak, amelyekről a megfelelő empirikus összefüggések az alábbiak szerint adhatók meg:

$$k_{nyitott} \cong -4,20 + 0,144 \cdot T$$

$$k_{zárt} \cong -4,02 + 0,135 \cdot T$$

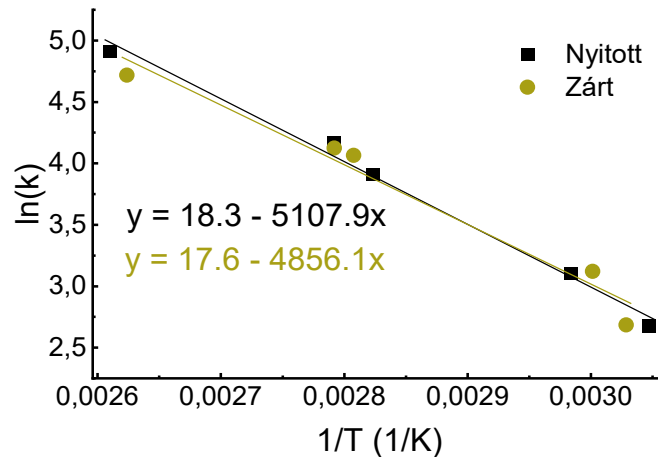
Ezzel szemben a nem izoterm esetekben jelentős szórás figyelhető meg a 40. c)-d) ábrákon és a mobilitási paraméter nem követ egyértelmű hőmérsékletfüggő trendet. Azonos vagy hasonló reprezentatív hőmérsékletek mellett is számottevően eltérő mobilitási értékek adódnak a különböző hőmérséklet-tartományok függvényében. Ez arra utal, hogy a hőmérséklet önmagában nem elegendő a penetráció dinamikájának leírására gradiens jelenlétében. A megfigyelt eltérések alapján feltételezhető, hogy a folyamatot további, gradienshez köthető hatások is befolyásolják.



40. A mobilitási paraméter a reprezentatív hőmérséklet függvényében nyitott és zárt kapilláris konfigurációk esetén: a) izoterm, nyitott kapilláris; b) izoterm, zárt kapilláris; c) hőmérséklet-gradiens, nyitott kapilláris; d) hőmérséklet-gradiens, zárt kapilláris. A gradiens esetekhez tartozó értékek az alkalmazott hőmérséklet-tartomány átlaghőmérsékletével kerültek ábrázolásra.

6.4.4. Arrhenius-elemzés

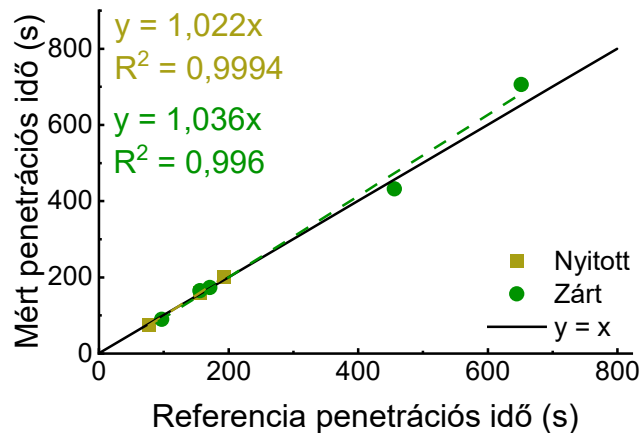
A mobilitási paraméter hőmérsékletfüggésének további vizsgálata izoterm körülmények között Arrhenius-ábrázolással történt, amint az a 41. ábrán látható. Mind a nyitott, mind a zárt kapilláris konfiguráció esetén lineáris kapcsolat adódott az $\ln k$ és az $1/T$ között, ami arra utal, hogy a penetrációs folyamatot a viszkozitás hőmérsékletfüggése determinálja. Az illesztett egyenesek meredekségéből meghatározott aktiválási energiák rendre körülbelül 42,5 kJ/mol (nyitott kapilláris) és 40,4 kJ/mol (zárt kapilláris) értékűek, ami hasonló alapmechanizmusra utal mindkét esetben.



41. ábra A mobilitási paraméter Arrhenius-ábrázolása nyitott és zárt kapillaris konfigurációk esetén izoterm körülmények között.

6.4.5. A számítási módszer validálása izoterm körülmények között

A alkalmazott számítási módszer validálása érdekében a penetrációs kísérletek elsőként izoterm körülmények között kerültek elvégzésre. A számított és a kísérletileg mért penetrációs idők összehasonlítása 100 mm penetrációs hossz esetén a 42. ábrán látható.



42. ábra A referencia és a kísérletileg mért penetrációs idők összehasonlítása 100 mm penetrációs hossz esetén izoterm körülmények között. A folytonos vonal az 1 meredekségű vonalat ($y = x$) jelöli.

A hőmérsékletmérés során fellépő hiba miatt az O-55 és O-62 kísérletekhez tartozó rekonstruált hőmérsékletmezők nem bizonyultak kellően megbízhatónak az elméleti kiértékeléshez, ezért ezek az esetek nem kerültek figyelembevételre a számított és mért penetrációs idők összehasonlításakor. Ugyanakkor a mért penetrációs adatok az izoterm viselkedés empirikus elemzésében továbbra is felhasználásra kerültek.

Az eredmények jó egyezést mutatnak a modell és a kísérleti adatok között. Az adatpontok az 1 meredekségű vonal közelében helyezkednek el, ami azt jelzi, hogy a modell hőmérséklet-gradiens hiányában jól írja le a penetráció dinamikáját. Az origón átmenő lineáris illesztések meredeksége nyitott, illetve zárt kapilláris esetén rendre 1,022 és 1,036, ami körülbelül 2–4%-os szisztematikus eltérésre utal.

Az átlagos eltérés közel 0%, míg az átlagos abszolút eltérés 5% alatt marad, és minden adatpont $\pm 10\%$ -os tartományon belül helyezkedik el az elméleti értékekhez képest. A magas determinációs együtthatók ($R^2 > 0,99$) tovább erősítik a modell és a kísérleti eredmények közötti szoros korrelációt.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a modell izoterm körülmények között megbízhatóan írja le a kapilláris penetrációt, így megfelelő referenciát biztosít a nem izoterm esetek elemzéséhez.

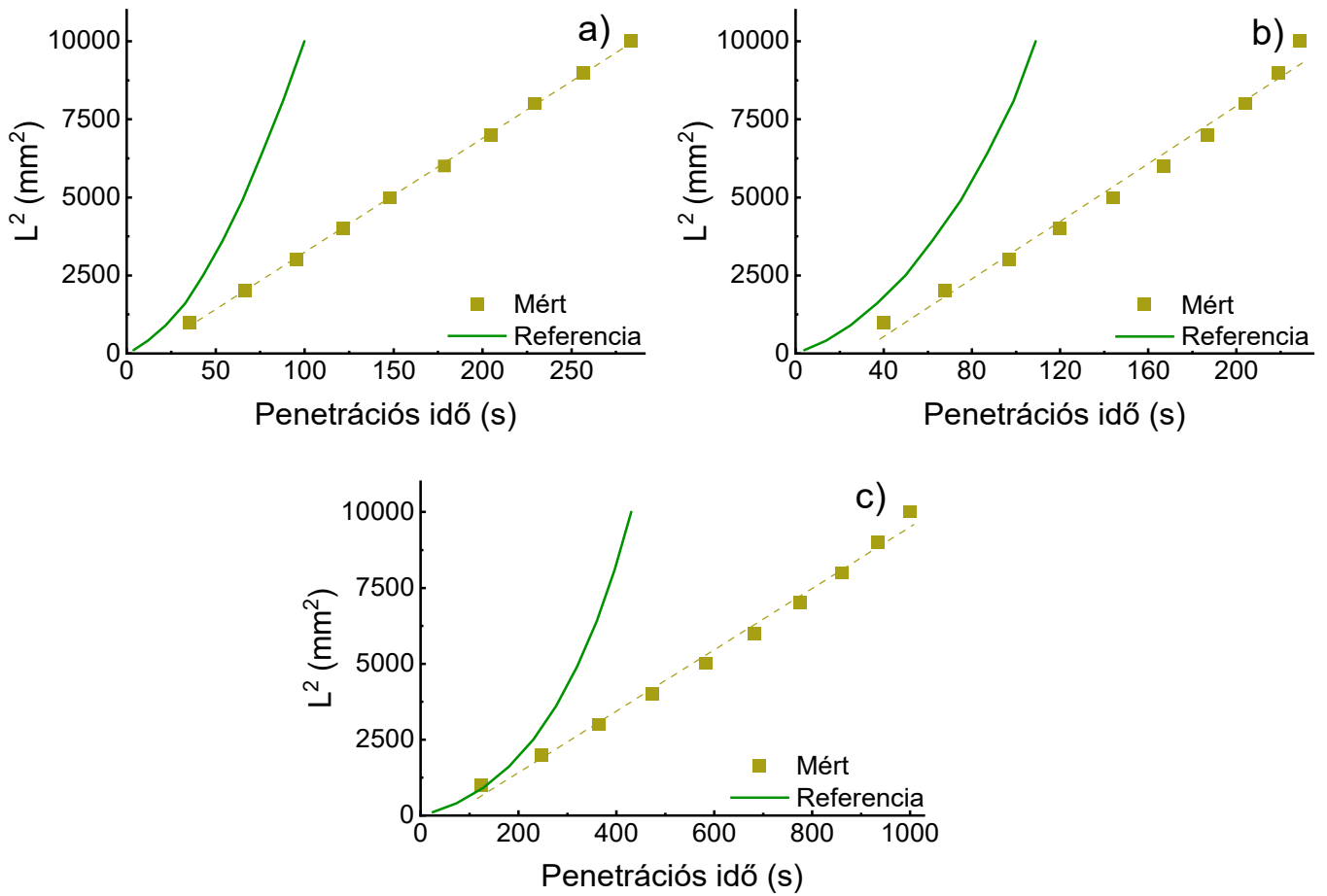
6.4.6. A referencia és mért penetrációs idők összehasonlítása hőmérséklet-gradiens esetén

Pozitív hőmérséklet-gradiens esetén a 43. ábrán jól látható eltérés figyelhető meg a referencia és a kísérletileg mért eredmények között. Minden vizsgált esetben a mért penetráció lassabbnak adódik a modell által előrejelzetttnél. Az eltérés a penetráció előrehaladtával növekszik, ami arra utal, hogy a hőmérséklet-gradiens hatása a folyamat során egyre jelentősebbé válik. Ez azt jelzi, hogy a penetráció nem írható le kizárólag a lokális hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságokkal, hanem további, gradienshez köthető hatások is szerepet játszhatnak.

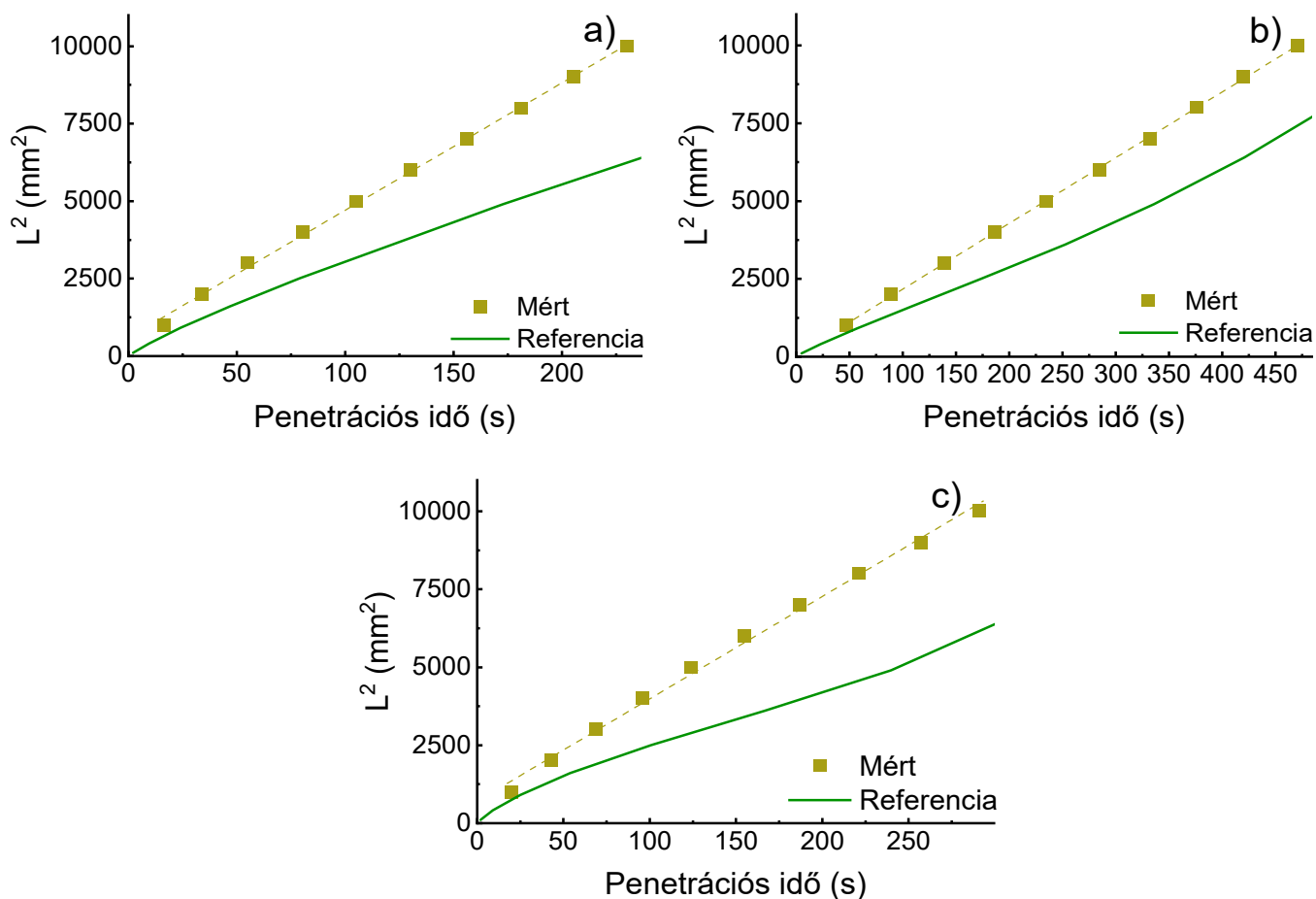
A 44. ábrán negatív hőmérséklet-gradienshez tartozó reprezentatív kísérletek láthatók. A pozitív gradienssel ellentétben ezekben az esetekben a mért penetráció minden konfigurációban gyorsabb a számítotttnál.

Bár a referencia görbék a változó hőmérsékletmező következtében nemlineáris viselkedést mutatnak, a kísérleti eredmények közel lineárisak maradnak, hasonlóan az izoterm esetekhez. A referencia és mért görbék közötti eltérés időbeli növekedése tovább erősíti, hogy a hőmérséklet-gradiens hatása a penetráció előrehaladtával fokozódik.

A pozitív és negatív gradiens esetén megfigyelt ellentétes trendek egyértelműen jelzik, hogy a hőmérséklet-gradiens előjele meghatározó szerepet játszik a penetráció dinamikájának alakulásában mind nyitott, mind zárt kapilláris konfiguráció esetén.



43. ábra A referencia (folytonos vonal) és a kísérletileg mért (négyzet pontok) penetrációs hossz négyzetének időfüggése reprezentatív kísérletek esetén pozitív hőmérséklet-gradiens mellett: (a) O-45–85, (b) O-40–90, (c) C-45–60.

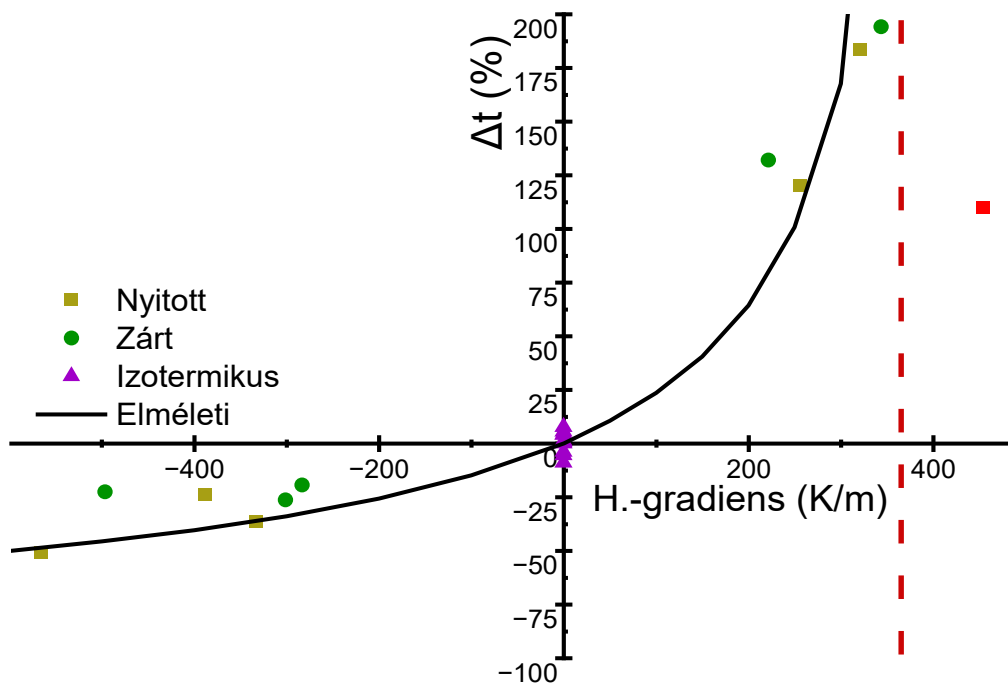


44. ábra A referencia (folytonos vonal) és a kísérletileg mért (négyzet pontok) penetrációs hossz négyzetének időfüggése reprezentatív kísérletek esetén negatív hőmérséklet-gradiens mellett: (a) O-110–60, (b) C-80–50, (c) C-120–50.

6B Tézis: Kimutattam, hogy nem izoterm körülmények között a referencia és mért penetrációs kinetika között szisztematikus eltérés jelentkezik, amelynek iránya a hőmérséklet-gradiens előjelétől függ. Megállapítottam, hogy pozitív hőmérséklet-gradiens esetén a mért penetráció lassabb, míg negatív gradiens esetén gyorsabb a kizárólag hőmérsékletfüggő termofizikai tulajdonságokkal (viszkozitás, felületi feszültség, sűrűség) a számolt referencia értékeknél. Igazoltam továbbá, hogy az eltérés a penetráció előrehaladtával növekszik, ami arra utal, hogy a klasszikus Washburn-típusú leírás – amely a folyamatot kizárólag a lokális anyagtulajdonságokon keresztül írja le – nem elegendő a nem izoterm penetrációs folyamatok pontos leírására.

6.4.7. Elméleti modell validációja

A 45. ábra a penetrációs idő eltérése és az alkalmazott hőmérséklet-gradiens közötti kapcsolatot szemlélteti az összes vizsgált esetre. Egyértelmű tendencia figyelhető meg: a pozitív gradiens a penetráció lassulásához, míg a negatív gradiens gyorsulásához vezet a modellhez viszonyítva. Az izoterm referenciaesetek az origó körül koncentrálódnak, ami megerősíti a modell érvényességét homogén hőmérsékleti viszonyok mellett. Az eredmények azt mutatják, hogy a hőmérséklet-gradiens nagysága és előjele egyaránt befolyásolja a penetráció dinamikáját. A szaggatott vonallal jelölt kritikus gradiens jelöli a modell érvényességének a határát, így az az utáni piros mérési pont kizárásra került a validálás során. A diagram alapján megállapítható, hogy az elméleti görbe és a mért pontok jó egyezést mutatnak, így a modell validáltnak tekinthető.



45. ábra A kísérletileg mért és a számított penetrációs idők közötti relatív eltérés függése az alkalmazott hőmérséklet-gradiens függvényében. A pozitív gradiens a penetráció lassulását, míg a negatív gradiens gyorsulását eredményezi. Az izoterm referenciaesetek ($G = 0$) pontjai az eltérés körül helyezkednek el, valamint a kritikus gradiens $K=365$ K/m és az emiatt a vizsgálatból kizárt mérési pont (piros négyzet).

6C Tézis: Kimutattam, hogy a hőmérséklet-gradiens hatását figyelembe vevő, 1B tézisben bemutatott összefüggés képes leírni a penetrációs idő változását a kísérletek során. A mért adatok és az elméleti előrejelzés között jó egyezés adódott, így a levezetett képlet validáltnak tekinthető.

7. Következtetések

A disszertációban a folyadék állapotú elektromotor impregnáló gyanták kapillárisba történő penetrációját vizsgálta téglalap keresztmetszetű kapillárisokba, különös tekintettel a geometria, a határfelületi tulajdonságok és a hőmérsékleti viszonyok együttes hatására. A kutatás célja a klasszikus kapilláris áramlási modellek kiterjesztése volt olyan, valós alkalmazásokhoz közelebb álló rendszerekre, amelyek az elektromos szigetelési és impregnálási technológiák szempontjából relevánsak.

Első lépésként a klasszikus Lucas–Washburn modell kiterjesztése történt meg vízszintes, téglalap keresztmetszetű kapillárisokra. A modell figyelembe veszi a polimer bevonatú rézvezetők, horonyszigetelő rétegek és a szabad folyadék–levegő határfelület által meghatározott geometriai sajátosságokat. A vizsgált rendszerekben a releváns termofizikai tulajdonságok – viszkozitás, felületi feszültség, sűrűség és peremszög – kísérleti meghatározása alapján a modellt kiterjedt mérési adathalmazon validáltam. Az izoterm körülmények között kapott jó egyezés igazolta, hogy a viszkózus–kapilláris egyensúly megfelelően írja le a penetráció dinamikáját, amennyiben további hajtóerők nincsenek jelen.

Erre az alpra építve a határfelületi kémia szerepét UV-kezeléssel módosított PEEK felületeken vizsgáltam. Az UV besugárzás oxidációt idézett elő, amely során poláris, oxigéntartalmú funkciós csoportok képződtek. Ezek a változások jelentősen gyorsították a gyanta penetrációját, amelynek hátterében a nedvesíthetőség javulása és a határfelületi energia módosulása áll. Ugyanakkor a dielektromos átütési szilárdság csökkenése is kimutatható volt, ami a felületen kialakuló elektromosan aktív állapotokra vezethető vissza. Az eredmények egyértelműen rámutatnak arra, hogy a felületi kémia egyidejűleg befolyásolja a folyadékáramlást és az elektromos tulajdonságokat, így ez az optimális rendszer kialakításához kompromisszum teremt az impregnálási hatékonyság és a szigetelési megbízhatóság között.

A harmadik vizsgálati irány a hőmérséklet-gradiens hatását elemezte nem-izoterm körülmények között. Izoterm esetben, a referencia klasszikus modell érvényessége megerősítést nyert, míg hőmérséklet-gradiens alkalmazásakor szisztematikus eltérések jelentkeztek a mért és referencia penetrációs idők között. A pozitív gradiens a folyamat lassulását, míg a negatív gradiens gyorsulását eredményezte. A jelenség leírására egy, a Marangoni-erőt figyelembe vevő kiterjesztett modell került bevezetésre, amely képes megragadni a pozitív és negatív gradiensek közötti aszimmetriát, valamint a kísérletileg megfigyelt eltéréseket.

Összességében megállapítható, hogy a téglalap keresztmetszetű rendszerekben végbemenő kapilláris penetráció nem írható le kizárólag a klasszikus viszkózus–kapilláris modellek segítségével. A határfelületi kémia és a hőmérséklet által indukált felületi feszültség gradiens egymástól független, de együttesen ható paraméterekként jelennek meg, amelyek jelentősen módosítják a penetráció dinamikáját és ezen keresztül annak kinetikáját is. Az eredmények egy átfogóbb szemléletet alapoznak meg a kapilláris folyamatok értelmezésében.

Mérnöki szempontból a bemutatott összefüggések új lehetőségeket kínálnak az impregnálási folyamatok szabályozására és optimalizálására. A felületmódosítás és a hőmérsékleti mező célzott kialakítása hatékony eszköz lehet a penetráció befolyásolására, ugyanakkor alkalmazásuk során figyelembe kell venni az egymással versengő hatásokat, különösen az elektromos szigetelési tulajdonságok romlásának kockázatát.

8. Tézisek

1A Tézis: Levezettem egy egyszerű, ipari gyakorlatban is alkalmazható penetrációs időmodellt téglalap keresztmetszetű kapillárisokra, amely figyelembe veszi a kapilláris alsó és felső határfelületén kialakuló eltérő nedvesítési viszonyokat, valamint a gravitáció hatását. A modell alapján a teljes penetrációs idő közvetlenül számítható a gyanta viszkozitásából, felületi feszültségéből, a peremszögéből és sűrűségéből, így alkalmas hajtű tekercselésű villamos motorok impregnálási folyamatának előzetes becslésére és technológiai tervezésére. A modell csak téglalap keresztmetszetre érvényes.

$$t_{\text{teljes}} = \frac{3 \cdot \mu}{d \cdot (\sigma_{lg} \cdot \cos \theta_h + \frac{d}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H)}$$

1B Tézis: Levezettem a téglalap keresztmetszetű kapillárisra módosított Washburn-modell hőmérséklet-gradiens hatását is figyelembe vevő kiterjesztését, amely nem izoterm viszonyok között írja le a kapilláris penetrációt, és speciális esetként visszaadja a gradiensmentes állapotot. A modell alapján kimutattam, hogy pozitív hőmérséklet-gradiens és nedvesítő rendszer esetén létezik egy kritikus penetrációs úthossz ($x_{kr} = -b/a$), amelynél a határfelületi hajtóerő a nullához tart, ezért a penetrációs idő a végtelenbe tart. Kimutattam továbbá, hogy adott penetrációs hossz esetén a hőmérséklet-gradiensnek is létezik egy kritikus értéke, amelynél ugyanez a feltétel teljesül: a hajtóerő megszűnik, és a modell végtelen penetrációs időt jelez előre. Ez alapján a kritikus úthossz és a kritikus gradiens egyaránt a levezetett modell matematikai érvényességi határát jelöli ki.

$$t = \frac{1}{a^2} \cdot \left(a \cdot x + b \cdot \ln \left| \frac{b}{a \cdot x + b} \right| \right)$$
$$\left(\frac{dT}{dx} \right)_{\text{krit}} = - \frac{\sigma_{lg} \cdot \cos \Theta}{x \cdot \frac{d\sigma_{sl}}{dT}}$$

1C Tézis: Kimutattam, hogy a hőmérséklet-gradiens előjele meghatározó módon befolyásolja a kapilláris penetráció kinetikáját: pozitív gradiens esetén a folyamat lassul, míg negatív gradiens esetén gyorsul. Kimutattam továbbá, hogy a hatás nem szimmetrikus, azaz azonos nagyságú gradiens esetén a pozitív gradiens által okozott penetrációs kinetika lassulás nagyobb mértékű, mint a negatív gradiens által okozott gyorsulás.

2 Tézis Kísérleti validáltam a téglalap keresztmetszetű kapillárisra levezett modell-egyenletet. Kimutattam, hogy a mért penetrációs idők az 1A tézisben megadott egyenletek által

meghatározott elméleti görbék közötti tartományba esnek, ami alátámasztja a modell fizikai megalapozottságát. A mért és számított értékek közötti eltérés mindössze 1,16%, ami igazolja a modell pontosságát és megbízhatóságát.

3A Tézis: Megvizsgáltam az UV-kezelés során kialakuló felületi hőmérsékletet, és kimutattam, hogy a legnagyobb alkalmazott intenzitás 110 mW/cm^2 mellett is a mért hőmérséklet ($\sim 170 \text{ }^\circ\text{C}$) a PEEK térfogati termikus degradációjához tartozó tartomány alatt marad ($\geq 220 \text{ }^\circ\text{C}$ az IEC 60085 [140] szerint). Ennek alapján megállapítottam, hogy a vizsgált felületi módosulások elsődlegesen UV-indukált fotokémiai oxidációhoz köthetők, így a vizsgálatok döntően a felületi hatások elemzésére korlátozódnak.

3B Tézis: Kimutattam, hogy UV-kezelés hatására a PEEK felületén oxidációs és fotodegradációs folyamatok indulnak meg, amelyek során oxigéntartalmú poláris funkciós csoportok – elsősorban karbonil- ($\text{C}=\text{O}$), karboxil- ($-\text{COOH}/-\text{COO}^-$), valamint C–O típusú kötések – alakulnak ki az aromás szerkezet részleges felnyílása és a polimer lánc hasadása mellett. Igazoltam, hogy 33 J/cm^2 fajlagos besugárzási értékig ezen vegyületek értéke növekszik, 11 at% ($\text{C}=\text{O}$) és 13,7 at% ($-\text{COOH}/-\text{COO}^-$) értékekig. Igazoltam, hogy ezek a változások több analitikai módszerrel is detektálhatók (a Raman-spektroszkópia az aromás gyűrűk degradációját és a kötésszerkezet átalakulását mutatta ki, az FTIR-mérések az oxigéntartalmú funkciós csoportok megjelenését jelezték, míg az XPS-analízis kvantitatívan is igazolta a felületi oxidációt és az új funkciós csoportok kialakulását).

3C Tézis: Megállapítottam, hogy az UV-kezelés hatására a PEEK felület nano-topográfiája módosul, és magasabb intenzitások esetén a szubmikronos érdesség csökkenése, illetve a felület enyhe kisimulása figyelhető meg. Kimutattam továbbá, hogy bár a morfológiai változások kvalitatív módon egyértelműen azonosíthatók AFM-vizsgálatokkal, a kvantitatív érdességi paraméterek nem mutatnak konzisztens trendet. Ennek alapján igazoltam, hogy a javuló gyantapenetráció nem magyarázható kizárólag a felületi morfológia változásával, hanem abban más, elsősorban kémiai hatások játszanak meghatározó szerepet.

4A Tézis: Kimutattam, hogy az UV-kezelés fajlagos energiájának növelésével a teljes penetrációs idő minden vizsgált hőmérsékleten monoton módon csökken. Igazoltam, hogy 33 J/cm^2 -ig növelt fajlagos besugárzás esetén a gyantapenetráció jelentősen felgyorsul, ami arra utal, hogy az UV-indukált felületi módosulások – elsősorban az oxidáció – meghatározó szerepet játszanak a penetráció kinetikájának javításában.

4B Tézis: Kimutattam, hogy a PEEK felületén kialakuló karboxil/karboxilát csoportok koncentrációjának növekedése minden vizsgált hőmérsékleten a penetrációs idő csökkenésével jár, és a hatás mértékét elsősorban az UV-besugárzás fajlagos energiája határozza meg. A penetrációs idő maximális csökkenése a -30% körül alakult 13,7 at% karboxil/karboxilát koncentráció mellett. A korábban levezetett kapilláris modell alapján a penetráció gyorsulása valószínűsíthetően a határfelületi tag, vagyis a $\sigma_{1g} \cdot \cos\theta_r$ szorzat módosulásával hozható összefüggésbe, amelyet az UV-indukált felületi oxidáció és a felületi polaritás növekedése indirekt módon alátámaszt.

5A Tézis: Kimutattam, hogy az UV-besugárzás a PEEK szigetelés dielektromos átütési szilárdságát már alacsony fajlagos besugárzási energiánál is jelentősen csökkenti, és a folyamat küszöbszerű viselkedést mutat. Megállapítottam, hogy az UV-kezelés hatására a kezdeti 101 kV/mm átütési szilárdság lecsökkent 88,6 kV/mm átlagos értékre. Megállapítottam, hogy az átütési szilárdság csökkenése nem arányos a felületen kialakuló karboxil/karboxilát csoportok koncentrációjával, hanem már alacsony oxidációs szinten bekövetkezik, majd magasabb besugárzási energiák esetén közel állandó értéken stabilizálódik. A jelenség hátterében a felületi oxidáció következtében kialakuló poláris funkciókhoz köthető töltéscsapdák és lokális elektromos térerősödés állhat, amely felület vezérelt átütési mechanizmust eredményez. Kimutattam továbbá, hogy az átütési szilárdság csökkenése fordított kapcsolatot mutat az UV-kezelés fajlagos intenzitásával.

5B Tézis: Az UV-kezelés technológiai alkalmazása a szigetelési követelmények által meghatározott korlátok mentén optimalizálандó. Kimutattam, hogy az UV-kezelés hatására a penetrációs kinetika javulása és a dielektromos átütési szilárdság csökkenése között nemlineáris, ellentétes irányú kapcsolat áll fenn. Igazoltam, hogy az UV-indukált felületi oxidáció egyidejűleg növeli a határfelületi kapilláris hajtóerőt és rontja a szigetelő tulajdonságokat, így a penetráció hatékonyságának növelése a dielektromos teljesítmény rovására történik. Ennek alapján megállapítottam, hogy az UV-kezelés alkalmazása mérnöki optimalizációt igényel, ahol az alkalmazható tartományt a penetrációs kinetika javulása és a szigetelési megbízhatóság közötti, alkalmazásfüggő kompromisszum határozza meg.

6A Tézis: Kimutattam, hogy nem izoterm körülmények között a penetrációs hossz négyzete és az idő közötti kapcsolat eltér a lineáris viselkedéstől, ami arra utal, hogy a folyamat leírásához az izoterm modell nem elegendő.

6B Tézis: Kimutattam, hogy nem izoterm körülmények között a referencia és mért penetrációs kinetika között szisztematikus eltérés jelentkezik, amelynek iránya a hőmérséklet-gradiens előjelétől függ. Megállapítottam, hogy pozitív hőmérséklet-gradiens esetén a mért penetráció lassabb, míg negatív gradiens esetén gyorsabb a kizárólag hőmérsékletfüggő termofizikai tulajdonságokkal (viszkozitás, felületi feszültség, sűrűség) becsült referencia értékeknél. Igazoltam továbbá, hogy az eltérés a penetráció előrehaladtával növekszik, ami arra utal, hogy a klasszikus Washburn-típusú leírás – amely a folyamatot kizárólag a lokális anyagtulajdonságokon keresztül írja le – nem elegendő a nem izoterm penetrációs folyamatok pontos leírására.

6C Tézis: Kimutattam, hogy a hőmérséklet-gradiens hatását figyelembe vevő, 1B tézisben bemutatott összefüggés képes leírni a penetrációs idő változását a kísérletek során. A mért adatok és az elméleti előrejelzés között jó egyezés adódott, így a levezetett képlet validáltnak tekinthető.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálás köszönetemet konzulenseimnek Prof. Dr. Kaptay Györgynek és Dr. Baumli Péternek valamint mindazoknak, akik hozzájárultak a disszertáció elkészítéséhez.

Köszönettel tartozom Prof. Dr. Szőri Milánnak, aki biztosította a viszkozitásmérésekhez szükséges berendezéseket a Miskolci Egyetem Kémiai Intézetében. Hálámat fejezem ki továbbá Prof. Dr. Hórvölgyi Zoltán Dezsőnek és munkatársának, Márton Péternek, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen végzett sűrűség- és felületi feszültség mérésekért.

Külön köszönet illeti Dr. Szabó József Tamást, aki a Raman- és FTIR-vizsgálatokhoz szükséges műszereket biztosította a Miskolci Egyetem Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézetében.

Továbbá köszönettel tartozom Prof. Dr. Erdélyi Zoltánnak, a Debreceni Egyetemen végzett XPS vizsgálatokért.

Hálásan köszönöm az Audi Hungaria Zrt. támogatását, amely a kísérletekhez szükséges alapanyagok biztosításával, valamint a vizsgálatok finanszírozásával járult hozzá a kutatás megvalósításához.

Köszönet illeti továbbá a DoboTech Kft.-t a hőmérsékletgradiens behatásának vizsgálatához tervezett penetrációs készülék legyártásáért, valamint Kastal Ádámot a kísérletek során nyújtott segítségéért.

Irodalomjegyzék

- [1] United Nations, Climate Change. Paris Agreement, 2015.
- [2] Z. Li, A. Khajepour, J. Song, A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles, *Energy* 182 (2019) 824–839. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.077>.
- [3] J. Du, F. Li, J. Li, X. Wu, Z. Song, Y. Zou, M. Ouyang, Evaluating the technological evolution of battery electric buses: China as a case, *Energy* 176 (2019) 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.084>.
- [4] X. Sun, Z. Li, X. Wang, C. Li, Technology Development of Electric Vehicles: A Review, *Energies* 13 (2019) 90. <https://doi.org/10.3390/en13010090>.
- [5] W. Cai, X. Wu, M. Zhou, Y. Liang, Y. Wang, Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles, *Automot. Innov.* 4 (2021) 3–22. <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00139-z>.
- [6] Weijun Yin, Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 13 (1997) 18–23. <https://doi.org/10.1109/57.637150>.
- [7] M. Kaufhold, H. Aninger, M. Berth, J. Speck, M. Eberhardt, Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 47 (2000) 396–402. <https://doi.org/10.1109/41.836355>.
- [8] I. López, E. Ibarra, A. Matallana, J. Andreu, I. Kortabarria, Next generation electric drives for HEV/EV propulsion systems: Technology, trends and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114 (2019) 109336. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109336>.
- [9] Z.Q. Zhu, D. Howe, Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, *Proc. IEEE* 95 (2007) 746–765. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.892482>.
- [10] A. Riedel, M. Masuch, M. Weigelt, T. Glassel, A. Kuhl, S. Reinstein, J. Franke, Challenges of the Hairpin Technology for Production Techniques, in: 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, Jeju, Korea (South), 2018: pp. 2471–2476. <https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549105>.
- [11] A. Kuehl, A. Riedel, A. Vogel, S. Hartl, T. Glaessel, M. Masuch, J. Franke, Robot-based Production of Electric Motors with Hairpin Winding Technology, (2019).
- [12] L. Hausmann, F. Wirth, J. Fleischer, Opportunities of Model-Based Production-Oriented Design of Stators with Hairpin Winding, in: 2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC), IEEE, Ludwigsburg, Germany, 2020: pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/EDPC51184.2020.9388186>.
- [13] Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik, Österreichischer Verband für Elektrotechnik, eds., *Elektromechanische Antriebssysteme 2023: Electromechanical Drive Systems 2023 :Tagungsband der 9. Fachtagung (VDE OVE) 8. und 9. November 2023 in Wien*, VDE Verlag, Berlin, 2024.
- [14] S.M. Goetz, R.L. F., S. Rivera, Hairpin Motors for Electromobility: Twists and Bends of a Technological Breakthrough that Initially Arrived A Century Too Soon, (2023). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2312.15830>.

- [15] J. Fleischer, L. Hausmann, F. Wirth, Production-oriented design of electric traction drives with hairpin winding, *Procedia CIRP* 100 (2021) 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.080>.
- [16] J. Pihera, P. Martinek, J. Klasna, B. Paslavsky, R. Polansky, V. Mentlik, P. Trnka, Partial discharges of thermally and electrically aged insulation, in: *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, Virginia Beach, VA, 2009: pp. 39–42. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377890>.
- [17] J. Richnow, P. Stenzel, A. Renner, D. Gerling, C. Endisch, Influence of different impregnation methods and resins on thermal behavior and lifetime of electrical stators, in: *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, Nuremberg, Germany, 2014: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/EDPC.2014.6984406>.
- [18] G. Stone, ed., *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*, IEEE, Piscataway, NJ Hoboken, NJ, 2004.
- [19] A. Nollau, D. Gerling, A new cooling approach for traction motors in hybrid drives, in: *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, IEEE, Chicago, IL, USA, 2013: pp. 456–461. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556136>.
- [20] D.R. Speer, W.J. Sarjeant, Resin processing and energy savings, in: *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480)*, IEEE, Indianapolis, Indiana, USA, 2003: pp. 133–135. <https://doi.org/10.1109/EICEMC.2003.1247869>.
- [21] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models, in: *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, IEEE, New Orleans, LA, USA, 2007: pp. 73–80. <https://doi.org/10.1109/07IAS.2007.60>.
- [22] C.E. Thurman, Trickle impregnation of small motors, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 5 (1989) 30–35. <https://doi.org/10.1109/57.32447>.
- [23] H. Dreisilker, Stator and rotor trickle impregnation, in: *1985 EIC 17th Electrical/Electronics Insulation Conference*, IEEE, Boston MA, USA, 1985: pp. 366–367. <https://doi.org/10.1109/EIC.1985.7458642>.
- [24] BD Tronic GmbH, Impregnation methods, (2026). <https://www.bdtronic.com/en-en/impregnation-methods/trickling/>.
- [25] T. Young, An essay on the cohesion of fluids, *Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1832) 171–172. <https://doi.org/10.1098/rspl.1800.0095>.
- [26] P.S. Laplace, H. Gordon, J. Gordon, *Burndy Library, Traité de mécanique céleste*, De L’Imprimerie de Crapelet : Chez J.B.M. Duprat, A Paris, 1798. <https://doi.org/10.5479/sil.338664.39088005644752>.
- [27] H.-J. Butt, K. Graf, M. Kappl, *Physics and chemistry on interfaces*, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [28] A.W. Adamson, A.P. Gast, *Physical chemistry of surfaces*, 6th ed, Wiley, New York, 1997.
- [29] B.V. Deryagin, N.A. Krotova, V.P. Smilga, Adhesion of Dielectrics, in: 1978.

- [30] J.N. Israelachvili, *Intermolecular and surface forces*, 3rd ed, Academic Press, Burlington, MA, 2011.
- [31] P.-G. De Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré, *Capillarity and Wetting Phenomena*, Springer New York, New York, NY, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21656-0>.
- [32] D. Myers, *Surfaces, Interfaces, and Colloids: Principles and Applications*, 1st ed., Wiley, 2002. <https://doi.org/10.1002/0471234990>.
- [33] M.G. Velarde, R.Kh. Zeytounian, eds., *Interfacial Phenomena and the Marangoni Effect*, Springer Vienna, Vienna, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2550-2>.
- [34] G. Kaptay, Classification and general derivation of interfacial forces, acting on phases, situated in the bulk, or at the interface of other phases, *J Mater Sci* 40 (2005) 2125–2131. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1902-2>.
- [35] G. Kaptay, Interfacial Forces in Dispersion Science and Technology, *Journal of Dispersion Science and Technology* 33 (2012) 130–140. <https://doi.org/10.1080/01932691.2010.548232>.
- [36] G. Kaptay, Interfacial Forces in Dispersion Science and Technology, *Journal of Dispersion Science and Technology* 33 (2012) 130–140. <https://doi.org/10.1080/01932691.2010.548232>.
- [37] G.M. Whitesides, The origins and the future of microfluidics, *Nature* 442 (2006) 368–373. <https://doi.org/10.1038/nature05058>.
- [38] J.P. Brody, P. Yager, R.E. Goldstein, R.H. Austin, *Biotechnology at low Reynolds numbers*, *Biophysical Journal* 71 (1996) 3430–3441. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(96\)79538-3](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(96)79538-3).
- [39] C. Bréchnignac, P. Houdy, M. Lahmani, European Materials Research Society, eds., *Nanomaterials and nanochemistry*, Springer, Berlin ; New York, 2007.
- [40] A. Marmur, R.D. Cohen, Characterization of Porous Media by the Kinetics of Liquid Penetration: The Vertical Capillaries Model, *Journal of Colloid and Interface Science* 189 (1997) 299–304. <https://doi.org/10.1006/jcis.1997.4816>.
- [41] N.J. Shirtcliffe, G. McHale, M.I. Newton, F.B. Pyatt, S.H. Doerr, Critical conditions for the wetting of soils, *Applied Physics Letters* 89 (2006) 094101. <https://doi.org/10.1063/1.2339072>.
- [42] A. Faghri, *Heat pipe science and technology*, Taylor & Francis, Washington, DC, 1995.
- [43] A. Mahajan, W.J. Hyun, S.B. Walker, G.A. Rojas, J. Choi, J.A. Lewis, L.F. Francis, C.D. Frisbie, A Self-Aligned Strategy for Printed Electronics: Exploiting Capillary Flow on Microstructured Plastic Surfaces, *Adv Elect Materials* 1 (2015) 1500137. <https://doi.org/10.1002/aelm.201500137>.
- [44] M. Smith, V. Cacucciolo, H. Shea, Fiber pumps for wearable fluidic systems, *Science* 379 (2023) 1327–1332. <https://doi.org/10.1126/science.ade8654>.
- [45] R. Lucas, Ueber das Zeitgesetz des kapillaren Aufstiegs von Flüssigkeiten, *Kolloid-Zeitschrift* 23 (1918) 15–22. <https://doi.org/10.1007/BF01461107>.
- [46] E.W. Washburn, The Dynamics of Capillary Flow, *Phys. Rev.* 17 (1921) 273–283. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.

- [47] R.R. Rye, J.A. Mann, F.G. Yost, The Flow of Liquids in Surface Grooves, *Langmuir* 12 (1996) 555–565. <https://doi.org/10.1021/la9500989>.
- [48] C.H. Bosanquet, LV. *On the flow of liquids into capillary tubes*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 45 (1923) 525–531. <https://doi.org/10.1080/14786442308634144>.
- [49] A. Siebold, M. Nardin, J. Schultz, A. Walliser, M. Oppliger, Effect of dynamic contact angle on capillary rise phenomena, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 161 (2000) 81–87. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(99\)00327-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(99)00327-1).
- [50] M.N. Popescu, J. Ralston, R. Sedev, Capillary Rise with Velocity-Dependent Dynamic Contact Angle, *Langmuir* 24 (2008) 12710–12716. <https://doi.org/10.1021/la801753t>.
- [51] F.F. Ouali, G. McHale, H. Javed, C. Trabi, N.J. Shirtcliffe, M.I. Newton, Wetting considerations in capillary rise and imbibition in closed square tubes and open rectangular cross-section channels, *Microfluid Nanofluid* 15 (2013) 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10404-013-1145-5>.
- [52] H. Xing, J. Cheng, C. Zhou, Effect of gradient wettability on capillary imbibition in open semicircular copper channel, *Physics of Fluids* 32 (2020) 112004. <https://doi.org/10.1063/5.0030006>.
- [53] J. Berthier, D. Gosselin, E. Berthier, A generalization of the Lucas–Washburn–Rideal law to composite microchannels of arbitrary cross section, *Microfluid Nanofluid* 19 (2015) 497–507. <https://doi.org/10.1007/s10404-014-1519-3>.
- [54] X. Wang, F. Liang, Z. Wang, G. Zhang, Capillary enhancement effects and kinetic performances of internal helical protrusion micropores, *Chemical Engineering Research and Design* 202 (2024) 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.01.008>.
- [55] X. Wang, Y. Zeng, Z. Yuan, F. Chen, W.K. Lo, Y. Yuan, T. Li, X. Yan, S. Wang, Forced capillary wetting of viscoelastic fluids, *Journal of Colloid and Interface Science* 662 (2024) 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.02.078>.
- [56] C. Wu, Y. Tang, L. Zhu, Y. Sun, S. Zhang, C. Yan, H. Tang, Enhanced capillary performance of nanostructures copper woven mesh wick for ultrathin heat pipes, *Applied Thermal Engineering* 242 (2024) 122476. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122476>.
- [57] E. Chatzigiannakis, N. Jaensson, J. Vermant, Thin liquid films: Where hydrodynamics, capillarity, surface stresses and intermolecular forces meet, *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 53 (2021) 101441. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101441>.
- [58] S. Van Mourik, A.E.P. Veldman, M.E. Dreyer, Simulation of capillary flow with a dynamic contact angle, *Microgravity Sci. Technol* 17 (2005) 87–93. <https://doi.org/10.1007/BF02872093>.
- [59] M. Hilpert, Effects of dynamic contact angle on liquid infiltration into horizontal capillary tubes: (Semi)-analytical solutions, *Journal of Colloid and Interface Science* 337 (2009) 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.04.013>.
- [60] D. Davidson, G.L. Lehmann, E.J. Cotts, Horizontal capillary flow of a Newtonian liquid in a narrow gap between a plane wall and a sinusoidal wall, *Fluid Dyn. Res.* 40 (2008) 779–802. <https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2008.04.003>.

- [61] Kaptay, G., Határfelületi jelenségek a fémesanyaggyártásban. 1. rész, A határfelületi erők osztályozása, *Kohászat* 142 (2009) 39–46.
- [62] P. Kolliopoulos, K.S. Jochem, R.K. Lade, L.F. Francis, S. Kumar, Capillary Flow with Evaporation in Open Rectangular Microchannels, *Langmuir* 35 (2019) 8131–8143. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00226>.
- [63] T.W. Sowers, R. Sarkar, S. Eswarappa Prameela, E. Izadi, J. Rajagopalan, Capillary driven flow of polydimethylsiloxane in open rectangular microchannels, *Soft Matter* 12 (2016) 5818–5823. <https://doi.org/10.1039/C6SM00897F>.
- [64] T. Chen, Capillary Force-Driven Fluid Flow in Open Grooves with Different Sizes, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 29 (2015) 594–601. <https://doi.org/10.2514/1.T4313>.
- [65] D. Yang, M. Krasowska, C. Priest, M.N. Popescu, J. Ralston, Dynamics of Capillary-Driven Flow in Open Microchannels, *J. Phys. Chem. C* 115 (2011) 18761–18769. <https://doi.org/10.1021/jp2065826>.
- [66] J. Berthier, K.A. Brakke, E.P. Furlani, I.H. Karampelas, V. Poher, D. Gosselin, M. Cubizolles, P. Pouteau, Whole blood spontaneous capillary flow in narrow V-groove microchannels, *Sensors and Actuators B: Chemical* 206 (2015) 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.09.040>.
- [67] P. Kolliopoulos, S. Kumar, Capillary flow of liquids in open microchannels: overview and recent advances, *Npj Microgravity* 7 (2021) 51. <https://doi.org/10.1038/s41526-021-00180-6>.
- [68] P. Kolliopoulos, K.S. Jochem, L.F. Francis, S. Kumar, Capillary flow of evaporating liquid solutions in open rectangular microchannels, *J. Fluid Mech.* 938 (2022) A22. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.140>.
- [69] P. Kolliopoulos, K.S. Jochem, D. Johnson, W.J. Suszynski, L.F. Francis, S. Kumar, Capillary-flow dynamics in open rectangular microchannels, *J. Fluid Mech.* 911 (2021) A32. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.986>.
- [70] R. Seemann, M. Brinkmann, E.J. Kramer, F.F. Lange, R. Lipowsky, Wetting morphologies at microstructured surfaces, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 102 (2005) 1848–1852. <https://doi.org/10.1073/pnas.0407721102>.
- [71] N.R. Tas, J. Haneveld, H.V. Jansen, M. Elwenspoek, A. Van Den Berg, Capillary filling speed of water in nanochannels, *Applied Physics Letters* 85 (2004) 3274–3276. <https://doi.org/10.1063/1.1804602>.
- [72] L.R. Fisher, P.D. Lark, An experimental study of the Washburn equation for liquid flow in very fine capillaries, *Journal of Colloid and Interface Science* 69 (1979) 486–492. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(79\)90138-3](https://doi.org/10.1016/0021-9797(79)90138-3).
- [73] F.H. Kriel, R. Sedev, C. Priest, Capillary Filling of Nanoscale Channels and Surface Structure, *Israel Journal of Chemistry* 54 (2014) 1519–1532. <https://doi.org/10.1002/ijch.201400086>.
- [74] S. Gruener, T. Hofmann, D. Wallacher, A.V. Kityk, P. Huber, Capillary rise of water in hydrophilic nanopores, *Phys. Rev. E* 79 (2009) 067301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.067301>.

- [75] L.-H. Chang, S. Kumar, Capillary Filling in Open Rectangular Microchannels with a Spatially Varying Contact Angle, *Langmuir* 39 (2023) 18526–18536. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c02865>.
- [76] D.P. Jones, D.C. Leach, D.R. Moore, Mechanical properties of poly(ether-ether-ketone) for engineering applications, *Polymer* 26 (1985) 1385–1393. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(85\)90316-7](https://doi.org/10.1016/0032-3861(85)90316-7).
- [77] M. Thiruchitrabalam, D. Bubesh Kumar, D. Shanmugam, M. Jawaid, A review on PEEK composites – Manufacturing methods, properties and applications, *Materials Today: Proceedings* 33 (2020) 1085–1092. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.124>.
- [78] F. Rahmitasari, Y. Ishida, K. Kurahashi, T. Matsuda, M. Watanabe, T. Ichikawa, PEEK with Reinforced Materials and Modifications for Dental Implant Applications, *Dentistry Journal* 5 (2017) 35. <https://doi.org/10.3390/dj5040035>.
- [79] R. Teng, Y. Meng, X. Zhao, J. Liu, R. Ding, Y. Cheng, Y. Zhang, Y. Zhang, D. Pei, A. Li, Combination of Polydopamine Coating and Plasma Pretreatment to Improve Bond Ability Between PEEK and Primary Teeth, *Front. Bioeng. Biotechnol.* 8 (2021) 630094. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.630094>.
- [80] L. Qin, S. Yao, J. Zhao, C. Zhou, T.W. Oates, M.D. Weir, J. Wu, H.H.K. Xu, Review on Development and Dental Applications of Polyetheretherketone-Based Biomaterials and Restorations, *Materials* 14 (2021) 408. <https://doi.org/10.3390/ma14020408>.
- [81] G. Berardi, S. Nategh, N. Bianchi, Y. Thioliere, A Comparison Between Random and Hairpin Winding in E-mobility Applications, in: *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Singapore, Singapore, 2020: pp. 815–820. <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9255269>.
- [82] A. Arzillo, P. Braglia, S. Nuzzo, D. Barater, G. Franceschini, D. Gerada, C. Gerada, Challenges and Future opportunities of Hairpin Technologies, in: *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, IEEE, Delft, Netherlands, 2020: pp. 277–282. <https://doi.org/10.1109/ISIE45063.2020.9152417>.
- [83] X. Wang, B. Li, D. Gerada, K. Huang, I. Stone, S. Worrall, Y. Yan, A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars, *Applied Thermal Engineering* 201 (2022) 117758. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117758>.
- [84] N. Pattanadech, N. Phloymuk, P. Nimsanong, C. Srinangyam, S. Jeenuang, C. Bunlaksananusorn, Additional parameters for elucidation of the dielectric behavior of stator winding in high voltage motors, *Energy Reports* 8 (2022) 3629–3635. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.282>.
- [85] P. Shetty, P. Dsilva, P. Sondar, B.G. Kumar, S. Hegde, Biodegradation of PEEK Piston Rings, *Polymer Degradation and Stability* 191 (2021) 109666. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109666>.
- [86] H.F. Brinson, L.C. Brinson, *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction*, Springer US, Boston, MA, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7485-3>.
- [87] A. Vesel, R. Zaplotnik, G. Primc, M. Mozetič, Kinetics of Surface Wettability of Aromatic Polymers (PET, PS, PEEK, and PPS) upon Treatment with Neutral Oxygen Atoms from Non-

- Equilibrium Oxygen Plasma, *Polymers* 16 (2024) 1381.
<https://doi.org/10.3390/polym16101381>.
- [88] P.M. Soares, A.C. Cadore-Rodrigues, G.C. Aragonez, S.L. Jahn, L.F. Valandro, G.K.R. Pereira, M.P. Rippe, Surface treatments for polyetheretherketone (Peek): Effects on the bond strength to a resin cement and on the fatigue performance of a bonded glass-ceramic, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 128 (2024) 103552.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103552>.
- [89] A.V. Pocius, *Adhesion and adhesives technology: an introduction*, 4th edition, Hanser, Munich Cincinnati, 2021. <https://doi.org/10.3139/9781569908501>.
- [90] X. Qin, W. Zhou, S. Zhang, Q. Xu, K. Wang, B. Li, T. Lian, M. Jiang, P. Liu, Improving the Blood Compatibility and the Gas Permeability of Polyether Ether Ketone Hollow Fiber Membrane Used for Membrane Oxygenator via Grafting Hydrophilic Components, *ACS Appl. Polym. Mater.* 5 (2023) 4045–4055. <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c00283>.
- [91] M.E. Deagen, E.P. Chan, L.S. Schadler, C.K. Ullal, Corona Treatment for Nanotransfer Molding Adhesion, *ACS Appl. Polym. Mater.* 1 (2019) 997–1005.
<https://doi.org/10.1021/acsapm.9b00028>.
- [92] G. Primc, Strategies for Improved Wettability of Polyetheretherketone (PEEK) Polymers by Non-Equilibrium Plasma Treatment, *Polymers* 14 (2022) 5319.
<https://doi.org/10.3390/polym14235319>.
- [93] Y. Wang, C. Liu, L. Chen, J. Bai, D. Wang, K. Gan, H. Liu, The effect of nitrogen plasma treatment on adhesive properties of PEEK, *Journal of Adhesion Science and Technology* 34 (2020) 2672–2684. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1781025>.
- [94] A. Riveiro, R. Soto, R. Comesaña, M. Boutinguiza, J. Del Val, F. Quintero, F. Lusquiños, J. Pou, Laser surface modification of PEEK, *Applied Surface Science* 258 (2012) 9437–9442.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.01.154>.
- [95] A. Wilson, I. Jones, F. Salamat-Zadeh, J.F. Watts, Laser surface modification of poly(etheretherketone) to enhance surface free energy, wettability and adhesion, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 62 (2015) 69–77.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.005>.
- [96] A. Yousaf, A. Farrukh, Z. Oluz, E. Tuncel, H. Duran, S.Y. Doğan, T. Tekinay, H.U. Rehman, B. Yameen, UV-light assisted single step route to functional PEEK surfaces, *Reactive and Functional Polymers* 83 (2014) 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.07.011>.
- [97] J. Deng, L. Wang, L. Liu, W. Yang, Developments and new applications of UV-induced surface graft polymerizations, *Progress in Polymer Science* 34 (2009) 156–193.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.06.002>.
- [98] C. Jama, O. Dessaux, P. Goudmand, L. Gengembre, J. Grimblot, Treatment of poly(ether ether ketone) (PEEK) surfaces by remote plasma discharge. XPS investigation of the ageing of plasma-treated PEEK, *Surface & Interface Analysis* 18 (1992) 751–756.
<https://doi.org/10.1002/sia.740181103>.

- [99] P. Xu, F. Zhu, X. Wang, J. Zhang, T. Sun, Roles of chemistry modification for surface wettability of Polyether-Ether-Ketone (PEEK) by ultraviolet laser ablation, *Mater. Res. Express* 10 (2023) 065304. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acdeca>.
- [100] T. Kondo, R. Watanabe, Y. Shimoyama, K. Shinohe, S.A. Kulinich, S. Iwamori, Effect of reactive oxygen species generated with ultraviolet lamp and plasma on polyimide surface modification, *Surface & Interface Analysis* 49 (2017) 1069–1077. <https://doi.org/10.1002/sia.6279>.
- [101] S. Giancaterina, A. Rossi, A. Rivaton, J.L. Gardette, Photochemical evolution of poly(ether ether ketone), *Polymer Degradation and Stability* 68 (2000) 133–144. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(99\)00181-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(99)00181-0).
- [102] I. Mathieson, R.H. Bradley, *Surface Oxidation of Poly Ether Ether Ketone Films using Ultraviolet/ Ozone*, (n.d.).
- [103] Y. Okada, T. Furumatsu, S. Miyazawa, M. Fujii, H. Takahashi, H. Kimura, T. Ozaki, N. Abe, Modification of the cell adhesion and hydrophilic characteristics of poly(ether-ether-ketone) by 172-nm Xenon excimer radiation, *Bio-Medical Materials and Engineering* 25 (2015) 169–175. <https://doi.org/10.3233/BME-151267>.
- [104] Jan.F. Rabek, *Polymer Photodegradation*, Springer Netherlands, Dordrecht, 1995. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1274-1>.
- [105] C. Li, B.C. Benicewicz, Synthesis of Well-Defined Polymer Brushes Grafted onto Silica Nanoparticles via Surface Reversible Addition–Fragmentation Chain Transfer Polymerization, *Macromolecules* 38 (2005) 5929–5936. <https://doi.org/10.1021/ma050216r>.
- [106] S. Iwamori, T. Miyashita, S. Fukuda, S. Nozaki, K. Sudoh, N. Fukuda, Effect of an interfacial layer on adhesion strength deterioration between a copper thin film and polyimide substrates, *Vacuum* 51 (1998) 615–618. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(98\)00260-7](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(98)00260-7).
- [107] S. Ikari, S. Ishida, T. Matsuoka, T. Hirayama, K. Kato, Effect of Oxygen Plasma Treatment on Adhesion of Copper Plating Film to Polyimide Film for Flexible Printed Circuits, *J. Soc. Mat. Sci., Japan* 59 (2010) 705–711. <https://doi.org/10.2472/jsms.59.705>.
- [108] M. Yoshida, G. Nakanishi, H. Yamanaka, S. Iwamori, Enhanced adhesion of copper plating to polyether ether ketone based on active oxygen species generated under ultraviolet irradiation, *Surface & Interface Analysis* 54 (2022) 759–766. <https://doi.org/10.1002/sia.7088>.
- [109] T.W. Giants, Crystallinity and dielectric properties of PEEK, poly(ether ether ketone), *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.* 1 (1994) 991–999. <https://doi.org/10.1109/94.368664>.
- [110] J. Ho, T.R. Jow, Effect of crystallinity and morphology on dielectric properties of PEEK at elevated temperature, in: *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, IEEE, Bologna, Italy, 2013: pp. 385–388. <https://doi.org/10.1109/ICSD.2013.6619864>.
- [111] T. Asada, Y. Ohki, M. Ikeda, Y. Umeshima, Electrical conduction and breakdown in polyolefin with carbonyl groups, in: *Proceedings of 1995 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, Inst. Electr. Eng. Japan, Tokyo, Japan, 1995: pp. 395–398. <https://doi.org/10.1109/ISEIM.1995.496592>.

- [112] J. Sworakowski, S. Nešpůrek, Traps for charge carriers in molecular materials formed by dipolar species: towards light-driven molecular switch, *Macromolecular Symposia* 212 (2004) 113–122. <https://doi.org/10.1002/masy.200450811>.
- [113] H. Tong, A. Ahmad, J. Fu, H. Xu, T. Fan, Y. Hou, J. Xu, Revealing the correlation between molecular structure and dielectric properties of carbonyl-containing polyimide dielectrics, *J of Applied Polymer Sci* 136 (2019) 47883. <https://doi.org/10.1002/app.47883>.
- [114] G. Kaptay, Modelling Interfacial Energies in Metallic Systems, *MSF* 473–474 (2005) 1–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.473-474.1>.
- [115] J. Thomson, XLII. *On certain curious motions observable at the surfaces of wine and other alcoholic liquors*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 10 (1855) 330–333. <https://doi.org/10.1080/14786445508641982>.
- [116] C. Marangoni, Difesa della teoria dell'elasticità superficiale dei liquidi. Plasticità superficiale, *Nuovo Cim* 3 (1870) 50–68. <https://doi.org/10.1007/BF02907032>.
- [117] A. Karbalaei, R. Kumar, H. Cho, Thermocapillarity in Microfluidics—A Review, *Micromachines* 7 (2016) 13. <https://doi.org/10.3390/mi7010013>.
- [118] R. Eötvös, Ueber den Zusammenhang der Oberflächenspannung der Flüssigkeiten mit ihrem Molecularvolumen, *Annalen Der Physik* 263 (1886) 448–459. <https://doi.org/10.1002/andp.18862630309>.
- [119] J.L. Shereshefsky, Surface Tension of Saturated Vapors and the Equation of Eötvös, *J. Phys. Chem.* 35 (1931) 1712–1720. <https://doi.org/10.1021/j150324a014>.
- [120] A. Medina, A. Pineda, C. Treviño, Imbibition Driven by a Temperature Gradient, *J. Phys. Soc. Jpn.* 72 (2003) 979–982. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.72.979>.
- [121] S.R. Sahu, V.S. Duryodhan, Capillary rise phenomenon in tubes subjected to temperature gradient, *Chemical Engineering Research and Design* 187 (2022) 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.025>.
- [122] A.A. Darhuber, J.M. Davis, S.M. Troian, W.W. Reisner, Thermocapillary actuation of liquid flow on chemically patterned surfaces, *Physics of Fluids* 15 (2003) 1295–1304. <https://doi.org/10.1063/1.1562628>.
- [123] G.J. Amador, Z. Ren, A.F. Tabak, Y. Alapan, O. Yasa, M. Sitti, Temperature Gradients Drive Bulk Flow Within Microchannel Lined by Fluid–Fluid Interfaces, *Small* 15 (2019) 1900472. <https://doi.org/10.1002/sml.201900472>.
- [124] D.R. Poirier, G.H. Geiger, *Transport phenomena in materials processing*, Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, Pa, 1994.
- [125] J.R.A. Pearson, On convection cells induced by surface tension, *J. Fluid Mech.* 4 (1958) 489–500. <https://doi.org/10.1017/S0022112058000616>.
- [126] M. Allibert, *Verein Deutscher Eisenhüttenleute, eds., Slag atlas, 2. ed., repr. 2012*, Verl. Stahleisen, Düsseldorf, 2012.
- [127] A. Navrotsky, Energetics of nanoparticle oxides: interplay between surface energy and polymorphism†, *Geochem Trans* 4 (2003) 34. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-4-34>.

- [128] International Electrotechnical Commission, IEC 60851-5:2008 + AMD1:2011 + AMD2:2019 (CSV), Winding wires – Test methods: Part 5 Electrical properties, (2019).
- [129] R. Cselkó, Á.Z. Tamus, L. Székely, Issues of Electrical Testing of Winding Wires, in: 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), IEEE, South Padre Island, TX, USA, 2025: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EIC63069.2025.11123393>.
- [130] Z.Á. Tamus, R. Cselkó, Effect of Bending-Induced Mechanical Stress on the Dielectric Response of Rectangular PAI/PEEK Insulated Winding Wire, in: 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), IEEE, South Padre Island, TX, USA, 2025: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EIC63069.2025.11123222>.
- [131] Z.Á. Tamus, R. Cselkó, Effect of the Bending Radius on the Breakdown Strength of Rectangular PAI/PEEK Insulated Winding Wire of Electric Motors, in: 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD), IEEE, Toulouse, France, 2024: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICD59037.2024.10613212>.
- [132] H. Vogel, Das temperaturabhangigkeitsgesetz der viskositat von flussigkeiten, (22) 645 (1921).
- [133] G.S. Fulcher, ANALYSIS OF RECENT MEASUREMENTS OF THE VISCOSITY OF GLASSES, *Journal of the American Ceramic Society* 8 (1925) 339–355. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1925.tb16731.x>.
- [134] G. Tammann, W. Hesse, Die Abhangigkeit der Viskositat von der Temperatur bei unterkuhlten Flussigkeiten, *Z. Anorg. Allg. Chem.* 156 (1926) 245–257. <https://doi.org/10.1002/zaac.19261560121>.
- [135] J. Tan, Y. Liu, S. Wen, T. Deng, W. Chen, N. Li, Y. Du, G. Kaptay, Modeling viscosity of SiO₂-Al₂O₃-CaO based slags using Arrhenius and VFT models as well as the CALPHAD method, *Journal of Molecular Liquids* 385 (2023) 122259. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122259>.
- [136] G. Kaptay, On the temperature dependence of surface tension: Historical perspective on the Eotvos equation of capillarity, celebrating his 175th anniversary, *Advances in Colloid and Interface Science* 332 (2024) 103275. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103275>.
- [137] S. Bantle, W. Burchard, Branching in epoxy resins: molecular weight as a function of the extent of reaction and critical behaviour, *Polymer* 27 (1986) 728–734. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(86\)90131-X](https://doi.org/10.1016/0032-3861(86)90131-X).
- [138] P. Bergmark, P. Flodin, Structure of the carbon chain polymer in unsaturated polyesters, *Polymer* 28 (1987) 1662–1666. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(87\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0032-3861(87)90008-5).
- [139] E. Kreyszig, H. Kreyszig, E.J. Norminton, *Advanced engineering mathematics*, 10th ed, John Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
- [140] Electrotechnical Commission, IEC 60085:2007. Electrical insulation – Thermal evaluation and designation, (n.d.).
- [141] D. Lin-Vien, ed., *The handbook of infrared and Raman characteristic frequencies of organic molecules*, 13. [print], Academic Press, Boston, 2006.

- [142] K.C. Cole, I.G. Casella, Fourier transform infrared spectroscopic study of thermal degradation in films of poly(etheretherketone), *Thermochimica Acta* 211 (1992) 209–228.
[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(92\)87021-2](https://doi.org/10.1016/0040-6031(92)87021-2).
- [143] K.C. Cole, I.G. Casella, Fourier transform infra-red spectroscopic study of thermal degradation in poly(ether ether ketone)-carbon composites, *Polymer* 34 (1993) 740–745.
[https://doi.org/10.1016/0032-3861\(93\)90357-G](https://doi.org/10.1016/0032-3861(93)90357-G).