

# A nedvességkondicionálás hatása a polimer-fém csavarkötések mechanikai jellemzőire

## The Effect of Moisture Conditioning on the Mechanical Properties of Polymer-Metal Screw Joints

Szalai Miklós László <sup>1\*</sup>, 0009-0005-7542-1154\*, Hansághy Pál <sup>1,2</sup>, 0009-0009-4007-821X, Kónya Gábor <sup>1</sup>, 0000-0003-1531-5921

<sup>1</sup> Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Óbudai Egyetem, Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2026.2.ENG.001>

### Kulcsszavak:

csavarozás  
páratartalom  
poliamid66  
szakítónyomaték

### Keywords:

screwing  
relative humidity  
polyamide 66  
breakaway torque

### Cikktörténet:

Beérkezett 2026. január 24.  
Átdolgozva 2026. április 18.  
Elfogadva 2026. május 10..

### Összefoglalás

A cikk a nedvességkondicionálás hatását vizsgálja PA66 alapanyagú polimer-fém csavarkötések szakítónyomatékára. Kontrollált környezeti feltételek mellett kondicionált mintákon végzett mérések alapján bemutatja a polimer nedvességtartalma és a kötés mechanikai viselkedése közötti összefüggéseket. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a környezeti páratartalom változása jelentős hatással van a csavarkötések reprodukálhatóságára, ami ipari szempontból fontos következtetésekhez vezet.

### Abstract

This paper investigates the effect of moisture conditioning on the breakaway torque of polymer-metal screw joints made of PA66 material. Measurements were performed on samples conditioned under controlled environmental conditions to analyze the relationship between polymer moisture content and joint mechanical behavior. The results demonstrate that variations in ambient humidity significantly influence the reproducibility of screw joints, highlighting important implications for industrial assembly processes.

## 1. Bevezetés

A csavarkötések a gépipari és szereléstechológiai alkalmazások egyik legelterjedtebb kötési megoldásai, mivel egyszerűen szerelhetők, oldhatók, valamint nagyfokú tervezési rugalmasságot biztosítanak. A modern ipari termékekben különösen a járműipari, elektromechanikai berendezések és még a kéziszerszámgépek esetében is egyre gyakrabban alkalmaznak polimer alapanyagú komponenseket, amelyekhez fém csavarokkal hoznak létre kötések. Ezen polimer-fém csavarkötések megbízhatósága kulcsfontosságú a termékek funkcionális működése, élettartama és minősége szempontjából [1] [2].

A sorozatgyártási környezetben alkalmazott csavarozási technológiák beállítása jellemzően a meghúzási nyomaték alapján történik. A gyakorlat azonban azt mutatja, hogy azonos meghúzási nyomaték alkalmazása mellett sem mindig érhető el azonos kötésminőség, még akkor sem, ha a geometria, az alkalmazott csavar és a szerelési paraméterek változatlanok. Ez a jelenség különösen

\* Kapcsolattartó szerző: Szalai Miklós László  
E-mail cím: [szalai.miklos@nje.hu](mailto:szalai.miklos@nje.hu)

polimer alapanyagú komponensek esetében figyelhető meg, ahol a kötés mechanikai viselkedése jelentős szórást mutathat. A probléma ipari szempontból azért kritikus, mert a kötésminőség ingadozása javítást, a szerelés megismétlését, selejtet vagy rejtett minőségbeli kockázatot eredményezhet, amely közvetlen hatással van a termelékenységre és a költségekre [3].

A polimerek, így a poliamid alapú műanyagok mechanikai viselkedése alapvetően eltér a fémekétől. Viszkoelasztikus jellegük miatt tulajdonságaik idő- és környezetfüggők, különösen érzékenyek a hőmérsékletre és a levegő páratartalmára. A PA66 (poliamid 66) anyag esetében a nedvességfelvétel jól ismert módon befolyásolja a rugalmassági moduluszt, a szilárdsági jellemzőket, valamint a kúszási és relaxációs folyamatokat. Ennek következtében a csavarkötés kialakulása során fellépő előfeszítő erő, a szakítónyomaték és a kötés teherbírása is módosulhat a polimer aktuális nedvességtartalmának függvényében [4] [5] [6].

Jelen cikk célja a nedvességkondicionálás hatásának kísérleti vizsgálata PA66 alapanyagú polimer-fém csavarkötések mechanikai jellemzőire. A kutatás során különböző páratartalmú környezetben kondicionált PA66 mintákon hoztunk létre csavarkötéseket, majd megmértük a szakítónyomatékot, valamint a polimer nedvességtartalmát. A mérések célja a nedvességtartalom és a csavarkötés mechanikai viselkedése közötti kvantitatív összefüggések feltárása volt. Az eredmények hozzájárulhatnak a polimer-fém csavarkötések megbízhatóbb tervezéséhez, valamint a szerelési technológiák ipari környezetben történő stabilizálásához és optimalizálásához [7].

A vizsgálatok alapját az a feltételezés képezte, hogy a PA66 alapanyag nedvességtartalmának növekedése mérhető módon befolyásolja a polimer-fém csavarkötések szakítónyomatékát, ezáltal hatással van a kötés kialakulására és reprodukálhatóságára [7] [8].

## 2. Kísérlettervezés

A kísérletek tervezése során elsődleges cél volt egy olyan vizsgálati módszertan kialakítása, amely ipari környezetben is releváns, ugyanakkor alkalmas a polimer-fém csavarkötések mechanikai viselkedését befolyásoló főbb hatások elkülönítésére és értékelésére. Ennek érdekében a kísérlettervezés a teljes szerelési folyamat figyelembevételével történt, az alapanyag kondicionálásától kezdve a csavarkötés létrehozásán át egészen a mérési eljárások meghatározásáig.

A vizsgálatok középpontjában a PA66 alapanyag nedvességtartalmának változása és annak hatása a csavarkötés kialakulására, valamint a mérhető szakítónyomaték állt. A vizsgált műanyag minta esetén a szakítónyomaték az a határpont, ahol a csavar menete kiszakad a műanyagból. A kísérletek során a környezeti feltételek különös tekintettel a levegő relatív páratartalmára kontrollált módon lettek változtatva, miközben a csavar geometriai és anyagjellemzői, valamint a csavarozási technológia paraméterei állandók maradtak.

### 2.1. Kísérlethez felhasznált anyagok

**Műanyag komponens:** A kísérletek során alkalmazott vizsgálati minták egy ipari környezetben is használt, fröccsöntött PA66 alapanyagú komponensből készültek, amely egy kézi szerszámgép kapcsoló elektronikájának tartóeleme. Ezt az alapanyagot elsősorban kedvező mechanikai tulajdonságai, jó feldolgozhatósága, valamint széles körű ipari alkalmazása miatt alkalmazzák a kézi szerszámgépek esetében is. A vizsgálatokhoz felhasznált polimer komponensek azonos gyártásból (*azonos fröccsöntési charge*) és beszállításból származtak. A mintadarabokat egyazon fröccsöntési ciklus során, egymást követő időpontokban gyártották, így a feldolgozási paraméterek és a kialakuló belső szerkezetek között érdemi eltérés nem volt feltételezhető. Ennek a mintaválasztási módszernek köszönhetően a fröccsöntési technológiából eredő anyagszerkezeti és tulajdonságbeli szórás minimálisra csökkenthető volt, ami lehetővé tette, hogy a kísérletek során megfigyelt különbségek döntően a nedvességkondicionálás hatására legyenek visszavezethetők. A csavarkötésben az alátét szerepét szintén a műanyag minta speciális geometriájú komponense töltötte be, amely furat átmérője a csavar külső átmérőjével egyezik meg. A műanyag komponens furata zsákfurat kialakítású, amely a csavar száránál hosszabb mérettel rendelkezik [8].

**Csavar komponens:** A csavarkötések létrehozásához közepes széntartalmú, bórötvöztetű acélból készült fém csavar került alkalmazásra, amely galvanikusan horganyzott felületkialakítással rendelkezik. A 20MnB4 alapanyagú (9.8) csavar geometriai kialakítása és anyagminősége ipari

szabványoknak megfelelő, így biztosítva a vizsgálatok során a reprodukálható és összehasonlítható kötéskialakulást. A csavar és a polimer komponens párosítása a gyártási gyakorlatban is alkalmazott anyagplasztifikációs megoldást reprezentálta, ezáltal növelve a kísérleti eredmények ipari relevanciáját. A csavargeometria REMFORM II típusú, trilobuláris keresztmetszettel rendelkező menetalakító kialakítású, amely a menetet hidegalakítással hozza létre. A speciális menetprofil csökkentett behajtási nyomatókat, alacsony radiális feszültséget és nagy kihúzási ellenállást biztosít, különösen műanyag és könnyűfém alapanyagok esetén.

A vizsgálatok során az alkalmazott anyagok és komponensek minden mérés esetén azonosak voltak, annak érdekében, hogy a kísérletek során kizárólag a környezeti feltételek, elsősorban a nedvességtartalom hatása érvényesüljön. Az anyagválasztás és az egységes mintakialakítás lehetővé tette a szakítónyomaték mérési eredményeinek megbízható összehasonlítását a különböző kondicionálási állapotok között.

## 2.2. Kísérlethez felhasznált berendezések

A kísérletek során alkalmazott berendezések kiválasztásánál elsődleges szempont volt a mérések pontossága, ismételhetősége, valamint az ipari környezetben is releváns mérési körülmények biztosítása. A vizsgálatok lebonyolításához a polimer minták nedvességtartalmának szabályozására és meghatározására, valamint a csavarkötések szakítónyomatékának mérésére alkalmas mérőeszközök kerültek alkalmazásra.

A minták nedvességekondicionálása Ascott CC-100iP típusú klímakamrában történt, amely lehetővé tette a levegő relatív páratartalmának és hőmérsékletének pontos, szabályozott beállítását.

A minták nedvességtartalmának meghatározására TA Instruments Discovery TGA Q5000 termogravimetrikus analízátor lett használva. A termogravimetriás módszer lehetővé teszi a PA66 minták nedvességtartalmának közvetlen, nagy pontosságú meghatározását, elkülönítve a nedvességhez köthető tömegvesztést az anyag termikus bomlásától, valamint biztosítja az eredmények szakirodalmi összehasonlíthatóságát [9].

A csavarkötések létrehozása és a szakítónyomaték mérése Atlas Copco STa6000 típusú vezérlőegységgel, IRTT-B 5-I06 nyomatókmérő transzducerrel és EBL25-RE elektromos csavarozóval történt TX15x50 bitfejjel. Ez a mérő- és csavarozórendszer lehetővé tette a meghúzási folyamat során fellépő szakítónyomaték értékek nagy pontosságú mérését és digitális adatrögzítését. A mérések minden esetben azonos berendezés- és paraméterbeállítások mellett zajlottak, csökkentve a mérési környezetből eredő szórást.

Az alkalmazott berendezések kombinációja lehetővé tette a polimer nedvességtartalma és a csavarkötések szakítónyomatéka közötti összefüggések megbízható vizsgálatát, miközben a kísérleti elrendezés ipari környezetben is megvalósítható mérési feltételeket reprezentált.

## 2.3. Vizsgált paraméterek a kísérletezés során

A lineáris kísérlettervnek megfelelően a nedvességtartalom változott fő hatótényezzőként, míg a csavar geometriai és anyagjellemzői, a csavarozási technológia paraméterei, valamint a mérési környezet egyéb jellemzői állandók maradtak. Ez a megközelítés lehetővé tette a nedvességtartalom és a szakítónyomaték közötti kapcsolat egyértelmű értelmezését. A klímakamra beállítási tartományán belül, a meghatározott 25-75% RH intervallumban, 5%-os lépésközökkel történtek a mérések, így biztosítva az egyenletesen változó, reprodukálható kísérleti körülményeket. A kezdő páratartalom szintje RH=25% volt, amelyhez a minták 3 napot töltöttek el a klímakamrában. Majd az első lépcsőn (RH=25%) történő mérés után minden egyes mérés között 24 óra telt el a klímakamrában az aktuálisan beállított, növekvő relatív páratartalom szintek között. Minden egyes mérési lépcső esetében 3 db mintán készültek el a mérések, ennek megfelelően 33 db mérés történt meg. A csavarozási fordulatszám ipari gyakorlatban alkalmazott, közepes tartományba eső értékre volt beállítva, üresjárat fordulat/szám: 490 1/min.

A mérések során a szakítónyomaték értéke minden esetben azonos mérési eljárás és berendezés alkalmazásával meghatározásra került, biztosítva az eredmények összehasonlíthatóságát a különböző kondicionálási állapotok között. A kapott mérési eredmények szolgáltak alapul a nedvességtartalom hatásának kvantitatív értékeléséhez és a csavarkötések mechanikai viselkedésének elemzéséhez.

### 3. Eredmények kiértékelése

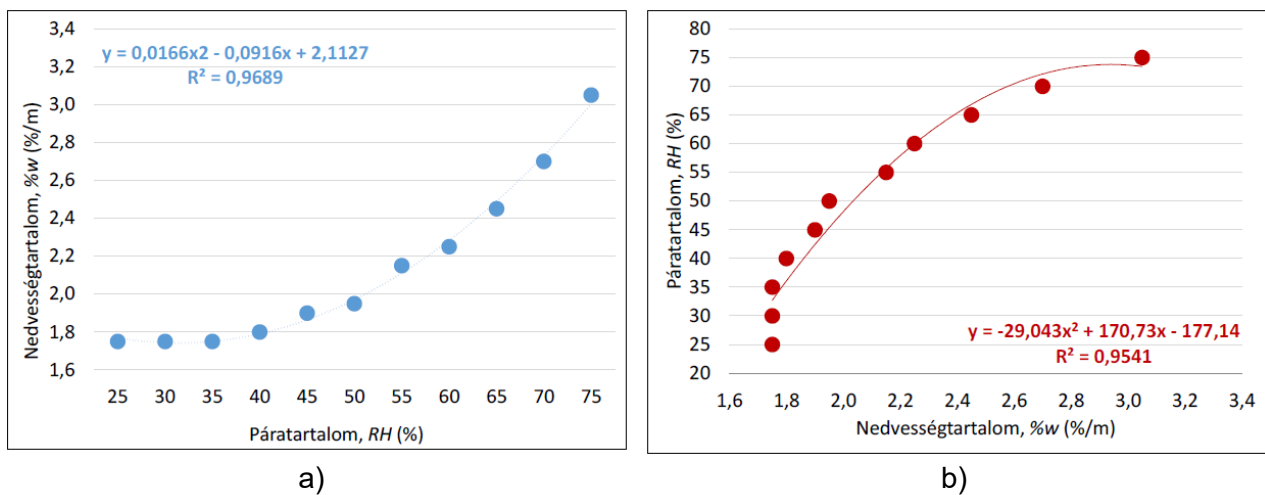
A kísérletek során kapott mérési eredmények kiértékelése a PA66 alapanyag nedvességtartalma és a polimer-fém csavarkötések szakítónyomatéka közötti összefüggések feltárására irányult. Az elemzés során a különböző kondicionálási állapotokhoz tartozó mérési eredmények egységes mérési eljárás és azonos anyag- és technológiai feltételek mellett, összehasonlítható formában lettek értékelve. Az eredmények bemutatása a nedvességtartalom és a szakítónyomaték kapcsolatának értelmezésére, valamint a csavarkötés mechanikai viselkedésére és annak ipari jelentőségére fókuszál.

#### 3.1. Nedvességtartalom mérések eredményei

A nedvességtartalom mérések eredményei az 1. ábra alapján igazolták, hogy a PA66 alapanyagú minták nedvességhelyvétele szoros összefüggést mutat a kondicionálás során alkalmazott környezeti feltételekkel. A különböző relatív páratartalmú környezetekben tárolt minták esetében jól elkülöníthető nedvességtartalom-szintek alakultak ki, amelyek lehetővé tették a nedvességhelykondicionálás hatásának kvantitatív értékelését.

Az 1. ábra eredményei alapján, ahol egy adott páratartalomszinten 3 db mérés átlaga van megjelenítve a PA66 alapanyag nedvességtartalma a levegő relatív páratartalmának növekedésével nem lineáris módon változott, azonban a vizsgált tartományban jól értelmezhető trend volt megfigyelhető. Alacsonyabb páratartalom mellett a minták nedvességtartalma alacsony szinten stabilizálódott, míg magasabb relatív páratartalom esetén a nedvességhelyvétel mértéke jelentősen megnövekedett.

A mért nedvességtartalom-értékek megfelelő alapot szolgáltatottak a további vizsgálatokhoz, különösen a szakítónyomaték mérések kiértékeléséhez. A kialakított nedvességtartalom-szintek lehetővé tették annak vizsgálatát, hogy a polimer nedvességhelyvétele milyen mértékben befolyásolja a polimer-fém csavarkötések mechanikai viselkedését, ezáltal megalapozva a következő alfejezetben bemutatott eredmények értelmezését.

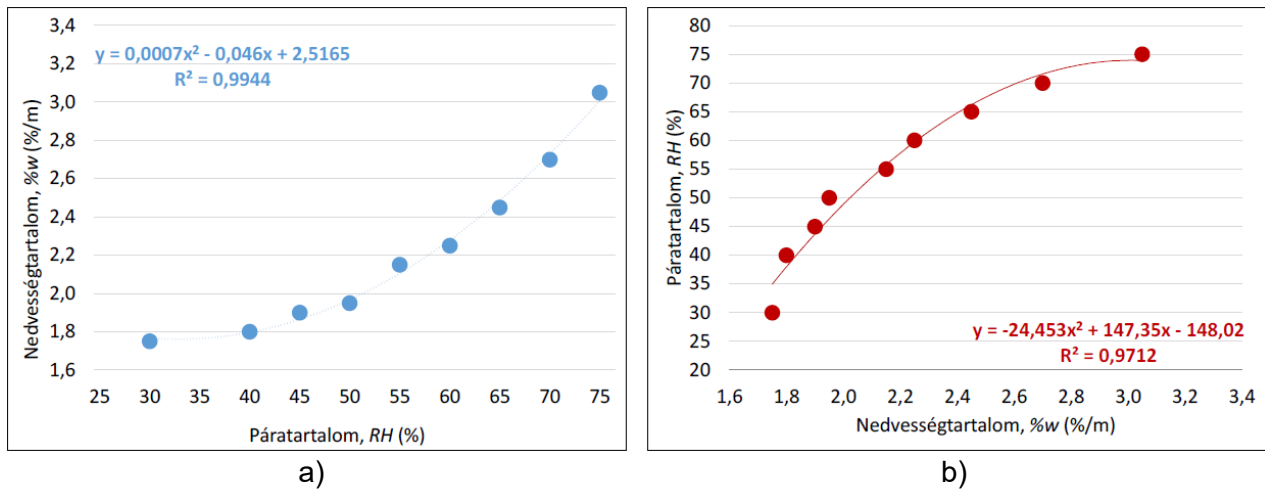


1. ábra. a) TGA-mérések eredményei a relatív páratartalom függvényében;  
 b) relatív páratartalom a TGA-eredmények függvényében

Annak érdekében, hogy a trendvonal illeszkedése és a további mérések eredményeinek összehasonlíthatósága ne torzuljon, a 25-35% RH közötti tartományban kapott eredmények átlagértéke került figyelembe véve a további értékelés során. Ami tehát 9 db mérés átlagát jelenti a 2. ábra alapján szemlélítve.

Ezt az eljárást az indokolta, hogy ebben a relatív páratartalom-tartományban a minták nedvességtartalma gyakorlatilag állandónak tekinthető, azaz nem figyelhető meg jelentős változás a mérési adatok között. Így a továbbiakban a 2. ábra alapján látható módon a 9 mérési eredmény

az 1. adatpontokban (RH=30%, w=1,75%) került összevonásra és központosításra az egységes értékelés érdekében.

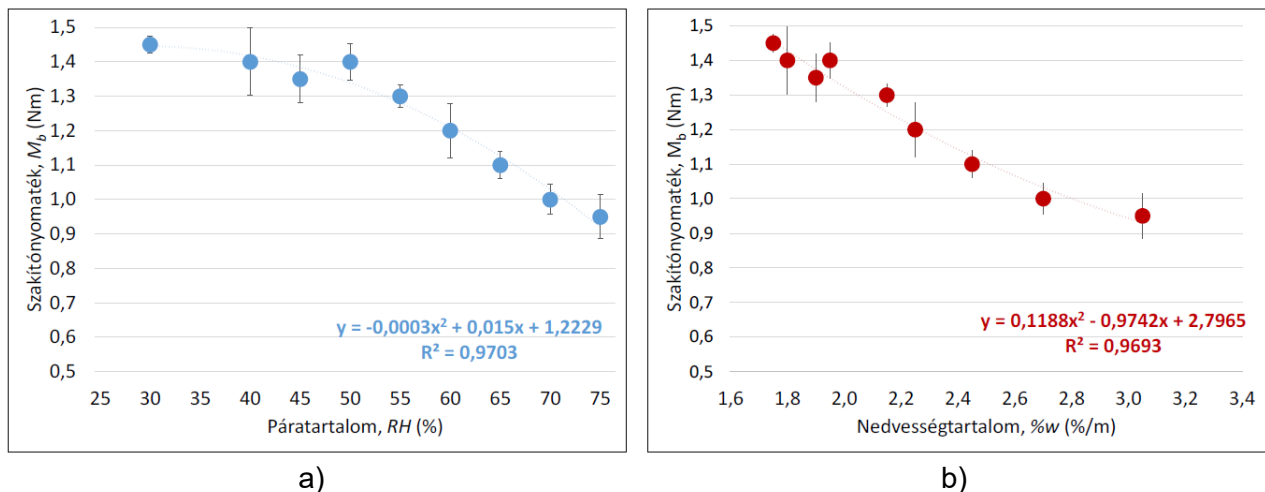


2. ábra. a) relatív páratartalom a korrigált TGA mérések eredményei függvényében;  
b) korrigált TGA mérések eredményei a relatív páratartalom függvényében

A korrekció eredménye egy áttekinthetőbb és statisztikailag jobban kezelhető adatsor, amely az ábrázolás és a trendvonal-illesztés szempontjából is egyszerűbb és értelmezhetőbb diagramokat eredményezett. A továbbiakban a szakítónyomaték mérési eljárás eredménye is hasonló módon került értékelésre és ábrázolásra a következőkben összehasonlíthatóság érdekében. Szintén egy adott páratartalom szinten 3 db mérés átlaga van megjelenítve, kivéve az 1. adatpontban, ahol 9 db mérés átlaga látható.

### 3.2. Szakítónyomaték mérések eredményei

A szakítónyomaték mérések eredményei a 3. ábra alapján egyértelmű összefüggést mutattak a PA66 alapanyag nedvességtartalma és a polimer-fém csavarkötések mechanikai viselkedése között. A különböző kondicionálási állapotokhoz tartozó mérési eredmények alapján megállapítható volt, hogy a polimer nedvességtartalmának változása mérhető módon befolyásolja a csavarkötések szakítónyomatékát.



3. ábra. a) relatív páratartalom a korrigált szakítónyomaték mérési eredményei függvényében;  
b) korrigált szakítónyomaték mérési a korrigált nedvességtartalom eredményei függvényében

Alacsonyabb nedvességtartalom mellett a csavarkötések jellemzően magasabb szakítónyomaték értékeket mutattak, ami a polimer nagyobb merevségével és kisebb láncmobilitásával magyarázható. A nedvességtartalom növekedésével a szakítónyomaték értéke csökkenő tendenciát mutatott, amely összhangban áll a PA66 anyag mechanikai tulajdonságainak nedvességfüggő változásával [10].

A mérési eredmények szórása a magasabb nedvességtartalmú állapotok esetében növekedést mutatott, ami a polimer viszkoelasztikus viselkedésének fokozódására, valamint a csavarkötés kialakulásának érzékenysége utal. Ez a jelenség ipari szempontból különösen releváns, mivel az azonos meghúzási nyomaték alkalmazása mellett fellépő kötésminőség-ingadozás egyik lehetséges magyarázatát adja.

A szakítónyomaték mérések eredményei megerősítették azt a feltételezést, hogy a polimer nedvességtartalma meghatározó szerepet játszik a polimer-fém csavarkötések kialakulásában és reprodukálhatóságában. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a csavarkötési technológia kizárólag nyomaték alapú beállítása önmagában nem minden esetben elegendő a stabil kötésminőség biztosításához, különösen változó környezeti feltételek mellett.

## 4. Összegzés

A cikkben bemutatott kísérletek célja a nedvességkondicionálás hatásának vizsgálata volt PA66 alapanyagú polimer-fém csavarkötések szakítónyomatékára. A vizsgálatok során kontrollált környezeti feltételek mellett kondicionált polimer mintákon kerültek kialakításra a csavarkötések, majd meghatározásra került a polimer nedvességtartalma és a kötés szakítónyomatéka. A kísérleti elrendezés lehetővé tette a nedvességtartalom hatásának elkülönített, reprodukálható vizsgálatát.

A nedvességtartalom mérések eredményei igazolták, hogy a PA66 alapanyag nedvességfelvétele szoros összefüggést mutat a kondicionálási környezet relatív páratartalmával. A különböző kondicionálási állapotokhoz tartozó nedvességtartalom-szintek megfelelő alapot szolgáltattak a csavarkötések mechanikai viselkedésének összehasonlításához.

A szakítónyomaték mérések egyértelműen kimutatták, hogy a polimer nedvességtartalmának növekedése a csavarkötések szakítónyomatékának csökkenésével jár. A magasabb nedvességtartalmú állapotok esetében a mérési eredmények nagyobb szórást mutattak, ami a polimer viszkoelasztikus viselkedésének fokozódására és a kötéskialakulás érzékenysége utal. Az eredmények alátámasztják azt a megfigyelést, hogy az azonos meghúzási nyomaték alkalmazása önmagában nem garantálja az azonos kötésminőséget polimer alapanyagú komponensek esetében.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a környezeti páratartalom és az abból eredő polimer nedvességtartalom meghatározó szerepet játszik a polimer-fém csavarkötések mechanikai viselkedésében. Az eredmények ipari szempontból rámutatnak a szerelési folyamatok stabilizálásának fontosságára, különösen olyan környezetekben, ahol a páratartalom jelentős ingadozást mutathat. A kutatás megállapításai hozzájárulhatnak a csavarkötési technológiák fejlesztéséhez, valamint a polimer alapanyagú komponensekhez alkalmazott kötési paraméterek tudatosabb megválasztásához.

A bemutatott kísérleti módszertan további kiterjesztése lehetőséget ad a nedvességkondicionálás időbeli lefutásának vizsgálatára, amely pontosabb képet adhat a polimer nedvességfelvétele és a csavarkötés mechanikai viselkedése közötti kapcsolat dinamikájáról. A jövőbeni kutatások során célszerű lehet a hőmérséklet és a relatív páratartalom együttes hatásának elemzése, mivel ipari környezetben ezek a paraméterek gyakran egyszerre változnak. A szerelési folyamat robusztusságának értékeléséhez különböző meghúzási stratégiák összehasonlítása is indokolt lehet azonos kondicionálási állapotok mellett. További irányt jelenthet eltérő PA66 anyagminőségek vagy csavargeometriák bevonása annak vizsgálatára, hogy a megfigyelt összefüggések mennyiben általánosíthatók. Az így nyert eredmények hozzájárulhatnak a polimer-fém csavarkötések tervezési irányelveinek és ipari alkalmazhatóságának további finomításához.

## Köszönetnyilvánítás

Jelen „A nedvességkondicionálás hatása a polimer-fém csavarkötések mechanikai jellemzőire” c. cikk a 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00021 projekt keretében jött létre. A 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2025-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] J. H. Bickford és S. Nassar, "Handbook of Bolts and Bolted Joints," CRC Press, Florida, USA, 1998.
- [2] V. B. Bhandari, "Design of Machine Elements," McGraw-Hill Education, N. D., India, 2019.
- [3] B. Zsolt, "A menetes kapcsolatok túréseinek hatása az előfeszített csavarkötésekre," GÉP - A Gépípari Tudományos Egyesület Műszaki Folyóirata LXIV. 6., Budapest, Hungary, 2013.
- [4] P. Wetzel és A. K. Sambale, "Hygromechanical Behavior of Polyamide 6.6: Experiments and Modeling", MDPI, Dresden, Germany, 2023. doi: 10.3390/polym15163387
- [5] J. Morales és D. Rodrigue, "The Effect of Reprocessing and Moisture on Polyamide Recycling: A Focus on Neat, Composites, and Blends", Macromolecular Materials and Engineering, 2024. doi: <https://doi.org/10.1002/mame.202400304>
- [6] A. H. H. A. D. D. & J. d. C. C. M. M. Brette, "Pure Hydrolysis of Polyamides: A Comparative Study" Aalborg, Denmark, Chemistry, vol. 6, no. 1, pp. 13–50, 2024.
- [7] M. Harun-Ur-Rashid és A. B. Imran, "Emerging Trends in Engineering Polymers: A Paradigm Shift in Material Engineering", Department of Chemistry, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, Bangladesh, 2024. doi:10.21926/rpm.2403024
- [8] M. Kohutiar, L. Kakošová és R. Janík, „Comprehensive Review: Technological Approaches, Properties, and Applications of Pure and Reinforced Polyamide 6 (PA6) and Polyamide 12 (PA12) Composite Materials", MDPI Polymers, Trenčín, Slovakia, 2025. doi: 10.3390/polym17040442
- [9] H. K. Lau, "Effect of Thermal Degradation on Polymer Thermal Properties", TA Instruments Application Notes, TA Instruments, Delaware, USA, 2025.
- [10] M. Odrobina, T. Deák és L. Székely, "The Effect of Crystallinity on the Toughness of Cast Polyamide 6 Rods with Different Diameters", MDPI, Debrecen, Hungary, 2020. doi: 10.3390/polym12020293