

## Az energiahatékonyság és az ivóvízhigiénia összehangolásának kihívásai

### Challenges of harmonizing energy efficiency and drinking water hygiene

*EÖRDÖGHNÉ Dr. MIKLÓS Mária, Dr. CAKÓ Balázs, LOCH Gábor*

Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar  
H-7624 Pécs, Boszorkány u. 2., Magyarország  
+36 72 503 650  
Kapcsolat: [cordoghne.maria@mik.pte.hu](mailto:cordoghne.maria@mik.pte.hu)

#### Abstract

*Energy-efficiency improvements in building services systems are increasingly encouraging the use of domestic hot water (DHW) systems operating at lower temperatures; however, this may introduce new drinking water hygiene risks. The prevention of Legionella growth in DHW systems has traditionally relied on high storage and circulation temperatures, which involves significant energy consumption. Low-temperature heat supply systems and modern DHW production solutions necessitate the application of new hygiene strategies and require an integrated risk management approach.*

**Keywords:** drinking water hygiene, Legionella risk, energy efficiency of domestic hot water systems, stagnant water network, legionella disinfection, water supply system volume minimization

#### Kivonat

*Az épületgépészeti rendszerek energiahatékonysági fejlesztései egyre alacsonyabb hőmérsékletű használati melegvíz (HMV) rendszerek alkalmazását ösztönzik, amely azonban új ivóvízhigiéniai kockázatokat eredményezhet. A HMV rendszerekben kialakuló Legionella-szaporodás megelőzése hagyományosan magas tárolási és cirkulációs hőmérsékletekkel történik, ami jelentős energiafelhasználással jár. Az alacsony hőmérsékletű hőellátás és korszerű HMV-előállítási megoldások új higiéniai stratégiák alkalmazását teszik szükségessé, integrált kockázatkezelési szemléletet igényel.*

**Kulcsszavak:** ivóvízhigiénia, legionella veszély, használati melegvíz-rendszerek energiahatékonysága, pangó vízhálózat, legionellamentesítés, vízellátó rendszer ürtartalom minimalizálás

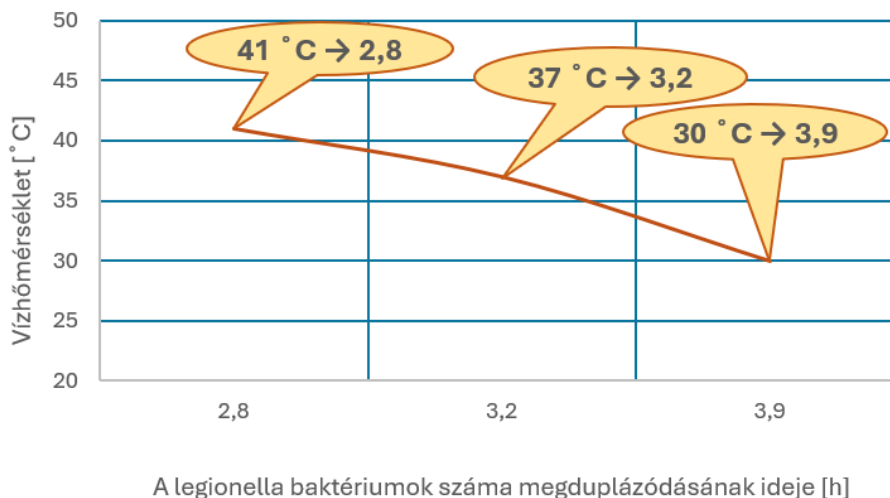
## 1. BEVEZETÉS

A *Legionella* nemzetségbe tartozó baktériumok jelenléte az épületgépészeti rendszerek vizes közegeiben régóta ismert közegészségügyi kockázatot jelent. A legionella baktériumok a természetes vizekben megtalálhatók – ott egészségügyi kockázatot nem okozva, de a kiépített épületgépészeti rendszerekben előállhatnak olyan körülmények, amelyek együttesen a baktériumok emberi egészségre veszélyes mértékű túlburjánzásához vezethetnek. A legfontosabb feltételek, amik a legionella baktériumok felszaporodásához együtt szükségesek:

- a 25 – 50 °C közötti vízhőmérséklet (ld. 1. ábra);
- zavarmentes hidraulikai környezet, lassú áramlás/pangás;
- tápanyag (a vízvezeték hálózatokban a baktériumok számára tápanyagot jelentenek a vízben oldott szerves anyagok, mikro-organizmusok, korrózióból származó anyagok, ill. a fentiekből renyhe áramlás mellett kialakuló biofilm).

Ezen három kiemeltnek nevezhető paraméter alapján további feltételek definiálhatók – vízcseré gyakoriság, rendszer ürtartalom, hálózatkialakítás, csőanyagválasztás, stb., de az alapfeltételeket a felsorolásban leírt három körülményben fogalmazhatjuk meg. Látható, hogy a 3 meghatározó rendszerjellemző közül kettőnek a legionella-szaporodást gátló tartományban tartása energiabefektetés igényel – magasabb hőmérséklet tartását, nagyobb befektetett szivattyúzási munkát [2]. Megfordítva a gondolatmenetünket azt állapíthatjuk meg, hogy az energiahatékonysági intézkedések ismétlődő módon ugyanazokat a higiéniai kockázati mintá-

zatokat hozzák létre, főleg a használati meleg- és hidegvíz ellátó rendszerekben. Így az ivóvízhigiéna és az energiahatékonyság összehangolása sok ma alkalmazott legionella-mentesítési megoldás esetén kihívást jelent. Ennek feloldását segítő rendszerkialakításokat törekszem elemezni a jelen kutatásban.

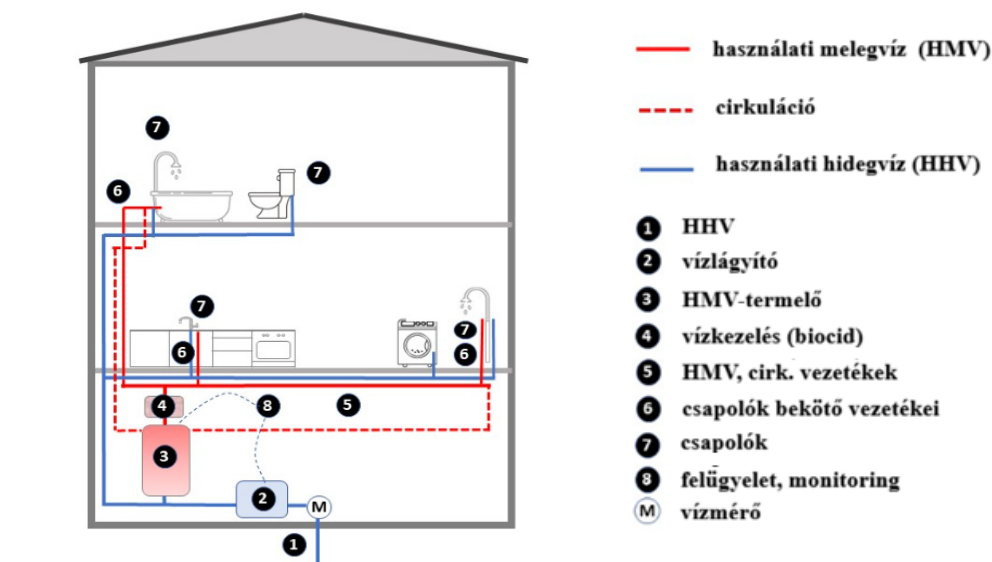


1. ábra. *Legionella* baktériumok szaporodási üteme a víz hőmérséklet függvényében ([1] alapján saját szerkesztés)

A *Legionella* szaporodása szempontjából kritikus hőmérsékleti tartomány 20–45 °C közé esik, amely egybeesik számos korszerű, energiahatékony épületgépészeti rendszer működési tartományával [3]. Az utóbbi években az alacsony hőmérsékletű rendszerek – különösen a negyedik generációs távhő és a „zöld” épületek – elterjedése új kihívásokat teremtett a mikrobiológiai biztonság fenntartásában.

A jelen tanulmányban négy nemzetközi publikáció összehasonlító elemzését mutatom be, különös tekintettel a vizsgálati körülményekre, az alkalmazott módszertanokra, valamint azokra a mérnöki következtetésekre, amelyek a gyakorlatban alkalmazhatók.

## 2. LEGIONELLA CSÍRASZÁM CSÖKKENTÉSI INTÉZKEDÉSEK MELEGVÍZ ELLÁTÓ RENDSZEREKBEN



2. ábra. *Legionella* szaporodás kockázatbecslése a háztartási vízellátó hálózat felülvizsgálata alapján ([4] alapján saját szerkesztés)

A [4] tanulmány (New Measures for Reducing Legionella in Hot Water Systems) átfogó módon vizsgálja a hagyományos használati melegvíz-rendszerek működését és azok mikrobiológiai kockázatait. A

baktériummentes és egyben energiahatékony melegvíztermelés paramétereinek vizsgálatához egy kockázatértékelő eszközt fejlesztettek, ami a mérnöki és minőségbiztosítási kockázatértékelésben már ismert FMEA (Failure Modes and Effects Analysis - Hibamód- és hatáselemzés) módszeren alapul. A kifejlesztett eszköz magában foglalja a Legionellával kapcsolatos hatásparamétereket a háztartási vízhálózatokban, és egyszerűsített megközelítést tesz lehetővé a kockázatbecslés során. A statisztikai alapú kockázatelemzés helyett a rendszer (ld. 2. ábra) elemeihez köthető kockázati tényezőket vizsgálja. Ezeket a kockázati tényezőket a Legionella előfordulását jelentősen befolyásoló ismert paraméterekre vonatkozó kérdéssorral (ld. 1. táblázat) mérik fel és elemzik.

A kockázatértékelés célja, hogy beazonosítsa azokat a vízhálózati területeket, ahol fennáll a Legionella szaporodás kockázata. Emellett javaslatot tesz a kiegészítő hőmérséklet- és biocidkezelésre a veszélyeztetett zónákban.

Kiinduló kockázati tényezők – kockázatértékelés ([4] alapján saját szerkesztés)

1. táblázat

Rendszer / rész	Legionella szaporodás kockázatot befolyásoló paraméter		A legionella kockázatának súlyossága		Az előfordulás valószínűsége		Az előfordulás elkerülésére vagy a kockázat csökkentésére irányuló ellenőrzési eljárás		Kockázati pontszám	
	Paraméter	Érték	Lehetséges hatás	Súlyosság	Lehetséges ok	Előfordulás valószínűsége	Előfordulási / ellenőrzési intézkedés	Hatékonyosság		
Hidegvíz ellátás	Legionella	Legionella spp.; mérések és kimutatás elvégezve	Közepes Legionella spp. tartalom	5	Szivattyúzott vívből	100%	1 ncs	Ni	0%	3
Hidegvíz ellátás	Hőmérséklet	Hőmérséklet megfelelő 0-20 °C	Legionella szaporodik	0	–	00%	9	–	0%	0
Hidegvíz ellátás	Hőmérséklet	Hőmérséklet megfelelő 0-20 °C	Legionella szaporodik	0	–	00%	9	–	0%	0
Melegvíz ellátás	Hőmérséklet	Időszakosan 20-25 °C; túl magas	Közepes Legionella-szaporodási kockázat	5	Gyenge hőszigetelés	0%	1 ncs	Ni	0%	3
Holtág / használt vezeték	Hőmérséklet	Ritkán használt hidegvíz vezeték	Közepes Legionella-szaporodási kockázat	6	24 db ritkán használt leágazási pont hulladékledobóknál	0%	5 ncs	Ni	0%	3
Melegvíz ellátás	Hőmérséklet	Hőmérséklet megfelelő >50 °C	A hőmérséklet gátolja a Legionella növekedését	0	–	00%	1	–	0%	0
Melegvíz ellátás	Hőmérséklet	Gyakran 45-50 °C; túl alacsony	Jelentős Legionella-szaporodási kockázat	6	Nem megfelelő termostatikus szelep	00%	1 ncs (cserélve lesz)	Ni	0%	6
Vízcsere	Vízárnyalás	Vízcsere naponta 1 alkalommal kevesebb	Kis Legionella-szaporodási kockázat	3	Elégtelen szivattyúkapacitás	00%	1 ncs	Ni	0%	7

### 2.1. Termikus legionellamentesítés elektromos rásegítő egységgel

Az elektromos rásegítés biztosítja a használati vízrendszer hőmérsékletének felügyeletét és optimális szabályozását. Riasztást is ad, ha a hőmérsékleti követelmények nem teljesülnek. 60 °C-os vízhőmérsékletre fűti a rendszert abban az esetben, ha a vezérlés számításai alapján fennáll a Legionella-csíraszám megduplázódásának lehetősége. A módszer keringtető rendszer esetén mutatkozott hatékonynak, mivel ekkor nem volt szükség a csapolók nyitására a teljes rendszer felmelegítéséhez. Az egyik vizsgált esetben a használati melegvíz hőmérsékletének megemelése egy készenléti funkcióval rendelkező lemezes hőcserélőben történt. Az eljárás alapján levont következtetés az volt, hogy az ajánlott minimális HMV-hőmérséklet a legionellamentesítéskor 65-70 °C. Ennél alacsonyabb, 60 °C-os kezelés nem befolyásolta a berendezés fertőzöttségét.

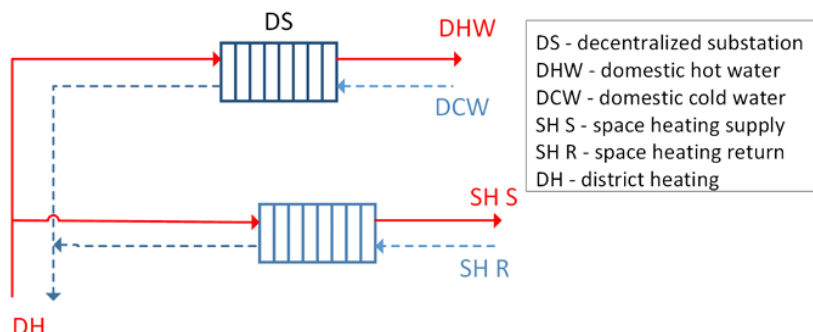
### 2.2. Biocid kezelés az alacsonyabb HMV-hőmérséklet miatti kockázat mérséklésére

A kezeléshez a hipoklórossavat (HOCl) elektrolízis útján só és víz felhasználásával állítják elő egy generátorral (Danish Clean Water). A hipoklórossavat (HOCl) a melegvíz-rendszerbe juttatva alacsonyabb hőmérsékleten pusztítható el a vízben lebegő Legionella. A módszer a biofilmet is eltávolítja. A hatékony, minimálisan szükséges vegyszeradagolás biztosítása érdekében célszerű pontokon elhelyezett érzékelőkkel követték a hidraulikai áramlási viszonyokat. A módszer nemcsak a fertőtlenítés során, hanem a folyamatos alacsony legionella csíraszám megtartásban is hatékonynak bizonyult.

## 3. ALACSONY HŐMÉRSÉKLETŰ TÁVHŐ RENDSZEREK ÉS ALTERNATÍV MEGOLDÁSOK

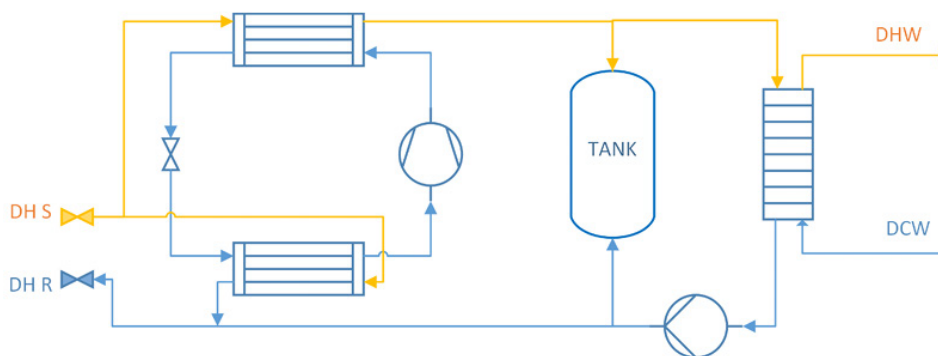
A dán műszaki egyetem kutatása [5] az alacsony hőmérsékletű távhőrendszerek alkalmazhatóságát vizsgálja Legionella-kockázat szempontjából. A kutatás különlegessége, hogy laboratóriumi és pilot rendszerekben, valós fogyasztási profilok szimulációjával elemezte a jelenséget.

A 3. ábra egy decentralizált átfolyós hőcserélős használati melegvíz-termelést mutat be. Ebben a rendszerben HMV-ellátó rendszer térfogat jelentősen csökken és a HMV nem kerül hosszabb ideig tárolásra, ami jelentősen csökkenti a baktérium szaporodásának lehetőségét. Nincs szükség HMV-cirkulációs rendszer kiépítésére, funkcióját egy bypass ág váltja ki. A rendszer hőmérséklete is alacsonyabb lehet; az ivóvízhigiéna szempontjából még megfelelő alsó határérték megállapítása további vizsgálatokat igényel. Ezekkel a megoldásokkal a HMV-termelés energiaszükséglete mintegy 30%-kal csökkenthető.



3. ábra. Decentralizált HMV-termelő rendszer vázlat [5]

A HMV-termelő rendszerben lokális hőmérséklet-emelés céljára mikro hőszivattyú alkalmazását mutatja be a 4. ábra. Az energiaforrás a távfűtési előremenő vagy visszatérő vize, az előbbi esetben a COP érték kedvezőbb. Az alacsony víz hőmérséklet miatt megnövekedett baktériumszaporodás kockázat kezelésére a kutatás során több fizikai és kémiai módszert tanulmányoztak a következő alfejezetekben leírt eredménnyel.



4. ábra. Mikrohőszivattyús kapcsolat – hőforrás: távfűtési előremenő víz [5]

### 3.1. Ionizáció legionellamentesítésre

A használati melegvíz-rendszerekben az ionizációs fertőtlenítési eljárás során réz- és ezüstionok, elektródák alkalmazásával károsítják a baktériumok sejtfalát, fehérjéit, ami a sejtek pusztulásához vezet. Megfelelő koncentráció mellett a módszer hatékonyan csökkentheti a Legionella jelenlétét. Kutatások szerint a módszer hosszú távon is eredményes, akár több éves kórházi vizsgálatokban is jelentős Legionella-csökkenést mutattak ki. Az eljárás hatékonyságát a víz paraméterei – vízminőség, pH-érték, víz hőmérséklet – nagymértékben befolyásolják. Tiszta víz, 7,6 alatti pH és magasabb hőmérséklet a kedvező.

A réz- és ezüstion-koncentrációra egyes országokban szigorú határértékek vonatkoznak, így például Dániában (a kutatás helyszínén) a módszer nem alkalmazható. Problémát jelent az is, hogy az ionizáció kevésbé hatékony a biofilm ellen, valamint túl magas ionkoncentráció esetén vízelszíneződés és vízkőképződés alakulhat ki. Emellett a rendszer beruházási és fenntartási költségei jelentősek, de több rendszer közös ionizáló berendezéssel történő üzemeltetése csökkentheti a költségeket.

### 3.2. Legionellamentesítés klórral

A Legionella folyamatos visszaszorításához általában 2–6 mg/L maradék klórkoncentráció szükséges, jelen kutatásban 4–6 mg/L koncentrációnál 25 °C-on három óra alatt tízezred részére csökkent a csíraszám. Amennyiben a Legionella amőbákhoz kapcsolódik, jóval magasabb klórkoncentráció szükséges a hatékony

fertőtlenítéshez. A rendszer időszakos tisztítására hiperkórozás alkalmaztak, 20 mg/L koncentrációval legalább két órán keresztül.

A klóros fertőtlenítéssel az egész rendszerben fenntartható a szükséges maradék fertőtlenítőszer-koncentráció, ugyanakkor a biofilmekben és amőbákban túlélő Legionella ellen kevésbé hatékony. Jelentős hátránya a klór erősen korrozív hatása, amely csőkárosodást okozhat, ezért gyakran védőbevonatok alkalmazása szükséges. Emellett a klór melléktermékei egészségügyi kockázatot, például rákkeltő hatást is jelenthetnek. Az éves üzemeltetési költsége valamivel alacsonyabb, mint a termikus fertőtlenítésé. Összességében ivóvíz hálózatokban kevésbé elterjedt megoldás legionella-mentesítésre.

### 3.3. Klór-dioxid

A klór-dioxid, mint egy oxidáló fertőtlenítőszer hatását a baktériumok sejtműködésének károsításával fejt ki, ezáltal pusztítja el a Legionella baktériumokat. Szakmai tapasztalatok alapján sokkfertőtlenítésnél 50–80 mg/L koncentráció fenntartása a tartályban 8 órán keresztül, valamint kifolyóknál 1 órán át a hatékonyan csökkenti mind a vízben lebegő, mind a felületekhez tapadó, biofilmben „megbúvó” Legionella csíraszámot. Folyamatos fertőtlenítésre is jó tapasztalatokat mutatott a kutatás, a használati melegvíz-rendszerekben körülbelül 0,5 mg/L maradék koncentráció elegendőnek bizonyult.

A klór-dioxid általában hatékonyabb, mint a szabad klór, és alkalmazása során az ivóvíz kellemetlen szaga is elkerülhető. Hátránya azonban, hogy könnyen lebomlik, ezért nehéz tartósan megfelelő maradék koncentrációt fenntartani a rendszerben [6].

A pontos adagoló- és ellenőrzőrendszerek telepítését és fenntartását, szakképzett kezelőszemélyzetet igénylő módszer összességében költséghatékonynak tekinthető a vizsgálatok alapján.

### 3.4. UV-sugárzás

Az ultraibolya (UV) fényes fertőtlenítés nem igényel vegyszeradagolást, rövid hullámhosszú, 254 nm-es sugárzással akadályozza meg a baktériumok DNS-ének szaporodását. Az üzemi tapasztalatok szerint a folyamatos UV-kezelés rendkívül gyors és hatékony fertőtlenítést biztosít, akár 1/100000 csíraszámcsökkenést is elérve rövid idő alatt. Előnye, hogy nem keletkeznek kémiai melléktermékek, nem rontja a vízminőséget, nem károsítja a csőhálózatot, és telepítése viszonylag egyszerű. Ugyanakkor az UV-fény nem biztosít maradék fertőtlenítő hatást a rendszer teljes hosszában, ezért nagy vízrendszerekben és biofilmmel szennyezett hálózatokban korlátozott a hatékonysága, a hálózat központi részein jobb eredmény volt mérhető, mint a távoli fogyasztási pontokon. Emiatt az UV-kezelést hosszú távon csak más fertőtlenítési módszerekkel kombinálva alkalmazzák.

### 3.5. Fotokatalízis

A fotokatalízis szintén használatos használati melegvíz-rendszerek fertőtlenítésére. A módszer során egy katalizátort – leggyakrabban titán-dioxidot – ultraibolya fény aktivál, amely erősen oxidáló hatású anyagokat hoz létre a baktériumok elpusztítására. A technológia különösen hatékony a vegyszerálló mikroorganizmusok ellen, és laboratóriumi vizsgálatokban akár 4,5–5-log csíraszámcsökkenést is elértek vele [7]. Előnye, hogy stabil eljárásnak tekinthető, nem keletkeznek mérgező melléktermékek, és nem rontja az ivóvíz minőségét, ezért szigorú ivóvízszabályozás mellett is alkalmazható. A fő beruházási költséget a fotokatalitikus berendezések jelentik, míg az üzemeltetési költség alacsony, mivel elsősorban fényenergiát és kis mennyiségű villamos energiát igényel. Emiatt a fotokatalízis hosszú távon energiatakarékos és környezetbarát fertőtlenítési megoldás lehet.

### 3.6. Fizikai módszerek

A fizikai vízkezelési módszerek közül a szűrés a legjelentősebb, amely membránszűrők alkalmazásával akadályozza meg a mikroorganizmusok bejutását a védett vízrendszerekbe. A szűrés rendkívül hatékony fertőtlenítési megoldás, ugyanakkor egyik legnagyobb hátránya a szűrők rövid élettartama. Emiatt a szűrőelemek rendszeres cseréje szükséges, ami jelentős üzemeltetési költségekkel jár. További problémát jelent az úgynevezett visszafertőződés lehetősége, mivel a szűrők hatékonysága gyorsan romolhat szennyezett vízzel vagy fröccsenő vízzel való érintkezés esetén [8]. A költségeket alapvetően a szűrők cseréjének gyakorisága határozza meg, egyes vizsgálatok szerint egyetlen vízvételi pont éves szűrőköltsége is jelentős lehet. Összességében a szűrés hatékony, de magas fenntartási igényű fizikai fertőtlenítési módszer, önmagában, hosszú távon legionella-mentesítésre nem javasolt.

### 3.7. Az alternatív legionella-mentesítési módszereket vizsgáló kutatás tanulságai

A kutatás egyik legfontosabb következtetése, hogy az alacsony hőmérséklet önmagában nem jelent nagyobb baktérium kockázatot. Sokkal meghatározóbb tényező a víz tartózkodási ideje és a rendszer áramlási viszonyai. Az átfolyós rendszerek előnye, hogy minimálisra csökkentik a stagnáló víz mennyiségét, ezáltal kedvezőtlen környezetet teremtenek a Legionella számára.

A szerzők hangsúlyozzák, hogy a legjobb eredmények kombinált stratégiákkal érhetőek el, amelyek magukban foglalják:

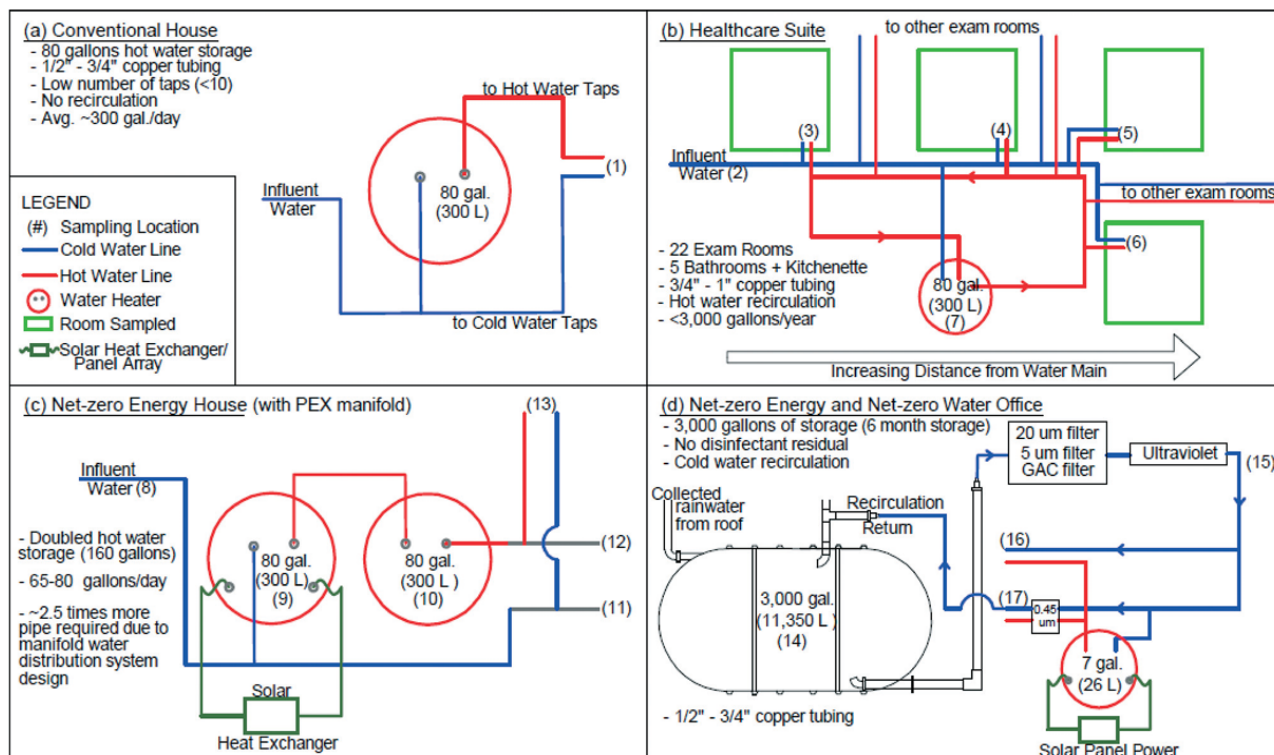
- a megfelelő hidraulikai kialakítást,
- az időszakos fertőtlenítést,
- valamint a korszerű technológiák alkalmazását.

## 4. ZÖLD ÉPÜLETEK VÍZELLÁTÓ RENDSZEREINEK MIKROBIOLÓGIAI SAJÁTOSSÁGAI

Az Environmental Science: Water Research & Technology folyóiratban megjelent tanulmány (Survey of green building water systems reveals elevated water age and water quality concerns) az energiahatékony épületek vízellátó rendszereiben vizsgálta a mikrobiológiai folyamatokat. A kutatás különböző kialakítású HMV-ellátó rendszereket alkalmazó (ld. 4. ábra), valós épületekben végzett terepi méréseken alapult, és különös figyelmet fordított a vízhasználatra.

A zöld épületek vízvezetékjeiben a mérési eredmények az mutatják, hogy gyakori üzemállapot volt a fertőtlenítőszer-maradvány alacsony szintje/hiánya. Az egészségügyi rendelőben >80 perces öblítésre volt szükség ahhoz, hogy a fő elosztórendszerben jelenlévőhöz hasonló klóramin-maradvány alakuljon ki (5a. ábra). Az ezeken a helyeken található csapokat jellemzően 15-30 másodpercig használják; ez nem volt elegendő ahhoz, hogy a vízvezeték-rendszer egyes pontjain klóramin-maradvány legyen jelen. A nettó nulla energiaigényű házban körülbelül 30 perces öblítésre volt szükség ahhoz, hogy a hidegvíz-rendszerben klórmaradvány keletkezzen az első helyszíni látogatás során.

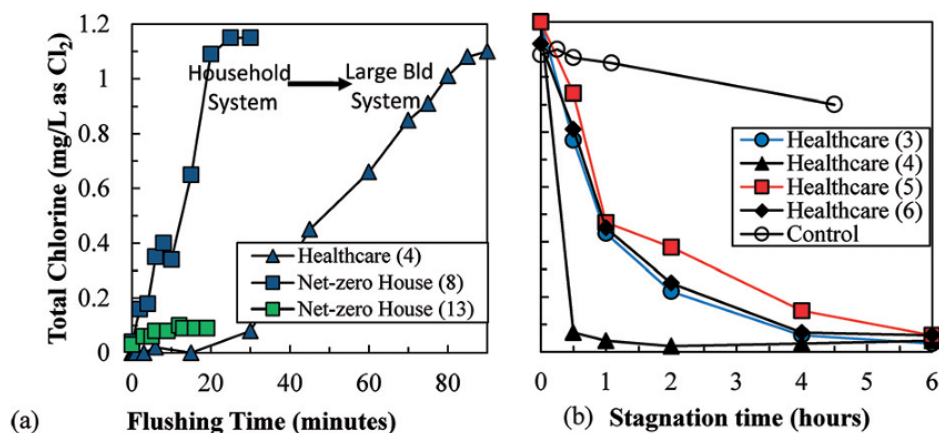
A hagyományos HMV-ellátó rendszerrel működő házban 0,71 mg L/l klórmaradvány volt mérhető Cl2 formájában az álló hideg vízben. Összehasonlítva, a nettó nulla energiaigényű ház vízmelegítőiben < 0,15 mg L/l klórmaradvány volt Cl2 formájában egy 20 perces öblítés során a napelemes fűtőberendezéssel járó további tárolási térfogat és a víz öregedése miatt (5c. ábra).



5. ábra. HMV-ellátási módok és mintavételi helyek az egyes vizsgált helyszíneken [9]

A vizsgálatok során meghatározták a Legionella fajok pontos mennyiségét. Az eredmények egyértelműen rámutattak arra, hogy a „zöld” épületek – bár energetikai szempontból kedvezőek – fokozott mikrobiológiai kockázatot hordozhatnak, amennyiben az üzemeltetés nem megfelelő.

A tanulmány egyik kulcsmegállapítása, hogy a vízkor az egyik legfontosabb paraméter, amely meghatározza a rendszer higiéniai állapotát.

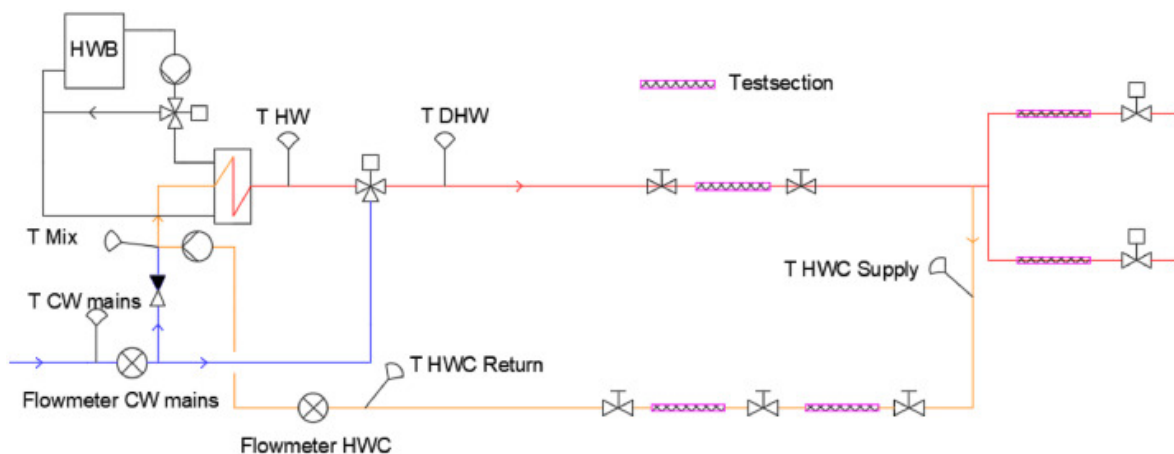


6. ábra. A teljes klórmareadék koncentráció [9]

## 5. LEGIONELLA ELLENI VÉDELEM ÉS AZ ENERGIAHATÉKONYSÁG OPTIMALIZÁLÁS OPTIMALIZÁLÁSA A HASZNÁLATI MELEGVÍZ CIRKULÁCIÓS RENDSZEREKBE

Knutsson és munkatársai (2025) tanulmánya [10] az energiahatékonyság és a higiéniai biztonság közötti kompromisszum kérdését vizsgálja használati melegvíz-cirkulációs rendszerekben.

A kutatás kiindulópontja, hogy az európai épületállomány energiafelhasználásának jelentős hányada a HMV-előállításához kapcsolódik, miközben a hagyományos Legionella-megelőzési módszerek energiaintenzívek. A szerzők célja egy olyan optimalizálási szemlélet kialakítása volt, amely egyidejűleg minimalizálja a hőveszteségeket, a szivattyúzási energiaigényt, valamint a mikrobiológiai kockázatot.



7. ábra. A teljes méretű melegvíz-keringetési (HWC) tesztberendezés vázlatja [10]

A tanulmány egy újszerű kettős megközelítést alkalmazott: a kontrollált laboratóriumi kísérleteket a valós validációval ötvözte. Az eredmények azt mutatják, hogy amikor a rendszert az előírt 50 °C-os visszatérő hőmérséklet fenntartása érdekében optimalizáltuk, a hőveszteségek közel azonosak voltak a cirkulációs rendszer alacsony (0,2 m/s) és magas áramlási sebessége (0,5 m/s) esetén. Jelentős eltérés a szivattyúzási munkában mutatkozott, ahol a magas áramlási sebességű működés 3,4-szer több energiát igényelt, mint az alacsony áramlási sebességű. Ez az alacsony áramlású stratégia esetében összesen körülbelül 12%-os éves energiamegtakarítást eredményezett. Megállapítható, hogy a kockázatalapú stratégia, amely az alacsony

áramlási sebességet (0,2 m/s), az 50 °C-os alap visszatérő hőmérsékletet és az időszakos hősokkokat ötvözi, jelentősen csökkentheti a rendszer energiafogyasztását, miközben fenntartja a Legionella elleni biztonságot.

A tanulmány egyik legfontosabb következtetése, hogy az energetikai és higiéniai célok nem feltétlenül ellentétesek, hanem megfelelő rendszertervezéssel egyidejűleg optimalizálhatók.

## 6. ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉS

A vizsgált négy publikáció közös kiindulópontja, hogy a Legionella baktérium elszaporodása **nem egyetlen tényezőre vezethető vissza**, hanem több, egymással kölcsönhatásban álló paraméter eredménye. Ezek közül a legfontosabbak: a hőmérséklet, a víz tartózkodási ideje (stagnálás), a biofilm jelenléte, valamint a rendszer hidraulikai kialakítása.

A tanulmányok különböző megközelítéseket alkalmaznak (kísérleti, pilot rendszer, terepi mérés, meta-elemzés), azonban következtetéseik erősen konvergálnak. Közös megállapítás, hogy a hagyományos, kizárólag hőmérséklet-alapú védekezési stratégiák nem elegendők. Ehelyett integrált megközelítésre van szükség, amely magában foglalja: a rendszer megfelelő tervezését, a szakszerű, precíz kivitelezést, az üzemeltetés optimalizálását, valamint a folyamatos monitorozást.

A modern rendszerekben alapvető ellentmondás jelenik meg:

*alacsony hőmérséklet → energiahatékonyság; magas hőmérséklet → higiéniai biztonság.*

A tanulmányok szerint ezt csak integrált megközelítéssel lehet feloldani. A négy tanulmány alapján a Legionella elleni védekezés leghatékonyabb módja a **multibarrier stratégia**, amely magában foglalja:

- a stagnálás minimalizálását,
- a hidraulikai optimalizálást,
- az intelligens hőmérséklet-szabályozást,
- valamint szükség esetén fertőtlenítési módszerek alkalmazását.

A stagnálás minimalizálása kapcsán a tanulmányok egyértelműen rámutatnak arra, hogy a víz tartózkodási ideje – azaz a „water age” – az egyik legkritikusabb paraméter. Megállapítják, hogy még viszonylag kedvezőtlenebb hőmérsékleti tartományban is alacsony maradhat a mikrobiológiai kockázat, amennyiben a víz folyamatos mozgásban van. Ezzel szemben stagnáló szakaszokban – például ritkán használt leágazásokban vagy túlméretezett tárolókban – gyorsan kialakul a biofilm, amely védett környezetet biztosít a Legionella számára. Az eredményekből kitűnik, hogy a hagyományos rendszerekben gyakori túlméretezés és alacsony fogyasztás kombinációja különösen kedvezőtlen. A stagnálás csökkentésére ezért a kutatások olyan megoldásokat javasolnak, amelyek a **rendszer térfogatának csökkentésére és a vízmozgás növelésére** irányulnak. Ide tartozik például az átfolyós melegvíz-termelés alkalmazása, a ritkán használt ágak megszüntetése vagy rendszeres átöblítése, illetve a felhasználási profilhoz igazított méretezés. A [9] tanulmány külön hangsúlyozza, hogy az alacsony vízhasználatú, energiahatékony épületekben aktív beavatkozás – például automatikus öblítés – nélkül a stagnálás gyakorlatilag elkerülhetetlen.

A hidraulikai optimalizálás fontos eleme a csőhálózat geometriai kialakításán túl a teljes rendszer áramlási viszonyainak tudatos megtervezése. Az egyenletes áramlási viszonyok biztosításával a rendszer hidraulikai és termikus kiegyenlítését kell elérni és a hidraulikai áramlási viszonyokat a biofilm-képződés szempontjából is értelmezni. Az áramlási sebességet a „multibarrier” stratégia egyik elemeként úgy kell megválasztani és fenntartani, hogy az folyamatos, egyenletes vízmozgást biztosítson, elkerülje a lokális stagnálást, valamint elegendő nyíróhatást fejtsen ki a biofilm kialakulásának korlátozására stabilizálódásának megakadályozására. A tanulmányok nem adnak konkrét számértéket az áramlási sebességre, a szakirodalomban ez jellemzően a turbulens tartományhoz köthető. A hidraulikai optimalizálás egyik kulcseleme tehát az egyenletes áramlási viszonyok biztosítása, amely magában foglalja a megfelelő csőátmérő-választást, a körök rövidítését, valamint a beszabályozó szerelvények alkalmazását. A modern tervezési szemlélet **nemcsak az energia- és komfortszempontokat veszi figyelembe, hanem a mikrobiológiai kockázat minimalizálását is.**

Az intelligens hőmérséklet-szabályozás kérdésében a tanulmányok különösen fontos paradigmaváltást jeleznek. Míg a hagyományos megközelítés a teljes rendszer magas hőmérsékleten tartására épült, addig az újabb kutatások rámutatnak, hogy ez energetikailag nem fenntartható, és önmagában nem is garantálja a mikrobiológiai biztonságot. Ehelyett egyre inkább az adaptív, lokálisan differenciált szabályozás kerül előtérbe. Ez azt jelenti, hogy a rendszer nem minden pontján azonos hőmérsékletet tartanak fenn, hanem a kockázatos szakaszokon – például alacsony áramlású zónákban – időszakos hőfertőtlenítést vagy célzott hőmérséklet-emelést alkalmaznak. Az intelligens szabályozás gyakorlati megvalósítása egyre inkább szenzorokra és adatvezérelt működésre épül, amely lehetővé teszi a valós idejű beavatkozást.

Összességében a négy tanulmány alapján kirajzolódik egy egységes szemlélet, amely szerint a Legionella elleni hatékony védekezés kulcsa a rendszer dinamikus működésének biztosítása. A stagnálás

minimalizálása, a hidraulikai viszonyok optimalizálása és az intelligens hőmérséklet-szabályozás nem különálló intézkedések, hanem egymást erősítő elemei egy komplex rendszernek. A modern megközelítés lényege, hogy a vízrendszert nem statikus infrastruktúraként, hanem folyamatosan változó, adaptív rendszerként kell kezelni, amelyben az energiahatékonyság és a mikrobiológiai biztonság egyidejű optimalizálása a cél.

## 7. KÖVETKEZTETÉSEK

A Legionella elleni védekezés a modern épületgépészet egyik kulcskérdése. A vizsgált tanulmányok alapján megállapítható, hogy a leghatékonyabb megoldás a multibarrier stratégia alkalmazása, amely több különböző módszer kombinációján alapul. A vizsgálati eredmények rámutattak a rendszerüzemeltetésben a komplex megközelítés fontosságára, az üzemi tapasztalatok visszacsatolásának jelentőségére. Az általános elvek érvényessége mellett jó példával szolgáltak arra vonatkozóan, hogy a csíraszám változás szempontjából a rendszer egyes mintavételi pontjain uralkodó körülmények a leginkább meghatározóak, ezzel mintegy kiemelve az ivóvízellátó hálózatok üzemeltetésében rejlő lehetőségeket és egyben felelősséget is.

Mindazonáltal a szakirodalomban továbbra is hiányzik egy átfogó elemzés, amely rendszerszinten értékeli az energiahatékonyság és az ivóvízhigiéncia közötti kölcsönhatásokat. A legtöbb publikáció vagy energetikai optimalizációra, vagy mikrobiológiai biztonságra koncentrált, miközben a két szempont egyidejű vizsgálata korlátozott. Ez különösen kritikus a jelenlegi energetikai átállás időszakában, amikor az alacsony hőmérsékletű rendszerek gyors ütemben terjednek a meglévő épületállományban.

A jövő rendszerei várhatóan intelligens érzékelőkkel és automatizált szabályozással működnek majd, lehetővé téve a valós idejű beavatkozást és a kockázatok minimalizálását.

A cikk alapját képező kutatást a Pécsi Tudományegyetem Korszerű ökológikus vízgazdálkodási és zöldfelületi rendszerek kutatócsoportban (H-7624 Pécs, Boszorkány út 2, Magyarország) / University of Pecs, Modern, Ecological Systems of Water Management and Green Surfaces Research Team (Boszorkány street 2, H-7624 Pecs, Hungary) végeztem.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A. Bürschgens és M. Pagel, „Die ganze Welt der Trinkwasserhygiene - Der Ratgeber für Praxis”, Kaarst: Honeywell GmbH, 2013.
- [2] M. Eördöghné Miklós, „Investigation of energy efficiency of pumping systems by a newly specified energy parameter,” in *EXPRES 2019 : 11th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy sources and Efficiency*, Subotica, Vajdasági Magyar Mérnökök és Műszakiak Egyesülete, 2019.
- [3] C. Schauer és e. al, Hygiene in potable water installations in buildings – Requirements for design, deployment, operation and maintenance., Brussel: Rehva, 2019. [https://www.researchgate.net/publication/357930215\\_Hygiene\\_in\\_Potable\\_Water\\_Installations\\_in\\_Buildings\\_Requirements\\_for\\_Design\\_Deployment\\_Operation\\_and\\_Maintenance](https://www.researchgate.net/publication/357930215_Hygiene_in_Potable_Water_Installations_in_Buildings_Requirements_for_Design_Deployment_Operation_and_Maintenance)
- [4] B. e. a. Kaj, „New measures for reducing legionella in hot water systems”, Danish Technological Institut, Hot Cool, 2023.
- [5] X. Yang, H. Li és S. Svendsen, „Alternative solutions for inhibiting Legionella in domestic hot water systems based on low-temperature district heating,” *Building Services Engineering Research & Technology*, %1. Kötet 37 (4), 2015. <https://doi.org/10.1177/0143624415613945>
- [6] M. Eördöghné Miklós, „Legionella-mentesítési megoldások vízhálózatokban,” *Magyar Épületgépészet*, 2016. [https://www.researchgate.net/publication/364657634\\_Legionella-mentesitesi\\_megoldasok\\_vizhalozatokban](https://www.researchgate.net/publication/364657634_Legionella-mentesitesi_megoldasok_vizhalozatokban)
- [7] Cheng YW et al., „Disinfection of Legionella pneumophila by photocatalytic oxidation,” *Water Research*, pp. 842-852, 2007.
- [8] Vonberg, RP, „ Impact of a silver layer on the membrane of tap water filters on the microbiological quality of filtered water,” *BMC Infectious Diseases*, p. 133, 2008.
- [9] A. P. a. M. A. E. William J. Rhoads, „Survey of green building water systems reveals elevated water age and water quality concerns,” *Environmental Science Water Research & Technology*, 2016. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2016/ew/c5ew00221d>
- [10] J. Knutsson és J. Wallin, „Optimizing energy efficiency and legionella control in hot water circulation systems: laboratory validation and field assessment in Swedish multifamily buildings,” *Energy Nexus*, 03 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125002517>