

# Fuzzy logikai alapú kapacitív szintmérő szenzorok széles hőmérséklet és nyomás tartományban működő állati hulladékfeldolgozó rendszerekhez

## Fuzzy logic based capacitive level sensor for animal waste processing systems with a wide range of temperature and pressure

Nagy Sándor

Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola,  
[nagy.sandor@phd.uni-obuda.hu](mailto:nagy.sandor@phd.uni-obuda.hu)

**Összefoglalás** — A tanulmány bemutatja az Integrated Sterilizer & Shredder (ISS) állati hulladékfeldolgozó rendszerben alkalmazott kapacitív szintmérő szenzorok fuzzy logikán alapuló optimalizálását. A 130 °C hőmérsékletű és 2,7 bar (abszolút) nyomású sterilizálási környezetben a hagyományos szintérzékelés pontatlan, mivel az anyaglerakódás, hőmérséklet-ingadozás és párasodás zavarják a mérést. A kifejlesztett fuzzy rendszer a dielektromos állandó, elektromágneses csillapítás és vezetőképesség paramétereinek együttes kiértékelésével 92%-os megbízhatóságot biztosít az extrém körülmények között.

**Kulcsszavak:** fuzzy logika, kapacitív szenzor, impedancia spektroszkópia, szintmérés, állati hulladékfeldolgozás

**Abstract** — This study presents a fuzzy logic-based optimization of capacitive level sensors used in the Integrated Sterilizer & Shredder (ISS) animal waste processing system. In the sterilization environment of 130°C temperature and 2.7 bar (absolute) pressure, conventional level sensing is inaccurate as material deposits, temperature fluctuations, and condensation interfere with measurements. The developed fuzzy system achieves 92% reliability under extreme conditions by simultaneously evaluating dielectric constant, electromagnetic attenuation, and conductivity parameters.

**Keywords:** fuzzy logic, capacitive sensor, impedance spectroscopy, level measurement, animal waste processing

### 1 BEVEZETÉS

A vágóhidak napi üzemideje alatt akár több tonna veszélyes hulladék is keletkezik, amelynek újrafeldolgozása napjainkban egyre elterjedtebb. Az állati hulladék újrahasznosítás folyamatának végeredménye fehérjeliszt és állati eredetű olaj. Előállításához kiemelt fontosságú szerepet tölt be az ISS (Integrated Sterilizer & Shredder), [1] mely a nevéből is következtethetően a befogadott terméket aprítja és sterilizálja. Ezen kémiai folyamat optimalizálásához kifejlesztett receptek

szükségesek mely a feldolgozandó, sterilizálandó terek összetételét és sűrűségét megadott határokon belül tartja, melyet a betáplálendő termékek, folyadékok folyamatos szabályozásával és szinten tartásával kivitelez. Ezen folyamat a 3000 literes térfogatú ISS tartályban történik, ahol a folyamat 20 °C-os kiindulási hőmérsékletéről akár 130 °C-ra emelkedik a sterilizálási fázisban, 1,7 bar abszolút nyomás mellett. Ebben a környezetben a hagyományosan egyszerűen beszerelt kapacitív szenzorok megbízhatatlanná válnak a következő tényezők miatt:

- Hőmérséklet-ingadozás: A fémkomponensek hőtágulása és a dielektromos állandók változása.
- Anyaglerakódás: A szenzor felületére tapadó zsír, fehérje vagy csontrészecskék.
- Összetétel-változás: A víz, csont, belsőség és hús arányának folyamatos változása.
- Turbulencia: A darálási folyamat során keletkező keverékáramlás és buborékképződés.

A kapacitív szintmérő működése alapvetően a dielektromos állandó változásának mérésén alapul<sup>[2]</sup>, ami a fenti körülmények között félvezető jeleket adhat. A hagyományos bináris (be/ki) jeladással működő rendszerek nem képesek megkülönböztetni a tényleges szintváltozást a környezeti hatásoktól.

A fuzzy logika ideális megoldást kínál erre a problémára, mivel képes:

1. Kezeleni a bizonytalan, pontatlan adatokat.
2. Több paramétert egyidejűleg értékelni.
3. Alkalmazkodni a változó üzemi körülményekhez.

Jelen tanulmány a kapacitív szintmérő szenzorok fuzzy logikán alapú optimalizálását mutatja be, amely lehetővé teszi a megbízható működést az ISS rendszer széles hőmérsékleti tartományában (20 °C-tól 130 °C-ig).

## 2 ANYAG ÉS MÓDSZER

### 2.1 Az ISS rendszer és a feldolgozási folyamat

A Celitron Agri ISS rendszer egy komplex hulladékfeldolgozó berendezés, amely az állati maradványokat értékes fehérjelisztté és olajjá alakítja. A feldolgozási folyamat főbb lépései, melyet a termelésre meghatározott feldolgozási receptben foglaltak alapján:

1. Előkészítés: 20 °C-os fogadó víz betöltése a 3000 literes tartályba.
2. Alapanyag adagolás: sterilizálandó állati hulladék (csont, belsőség, hús) recept szerinti bevitele, adagolása.
3. Homogenizálás: A feldolgozandó termék folyamatos keverése és aprítása 150 °C-os gőz hozzávetésével, a meghatározott hőmérséklet határig.
4. Előfőzés: 95 °C-ra fűtés, majd meghatározott időintervallumban a termék puhítása és a szemcseméret csökkentése (finomítása) történik.
5. Sterilizálás: 130 °C-on, 1,7 bar (relatív) nyomáson, telített gőz környezetben a sterilizálási szinthez szükséges időintervallumig.
6. Szeparálás és szárítás: A folyadék és szilárd fázisok elválasztása.

Az előzőekben ismertetett folyamat során a kapacitív szintmérő szenzorok kulcsszerepet töltenek be a töltöttségi szint folyamatos és pontos detektálásában, ezáltal támogatva a rendszer megbízható működését, mely alapján az automatika vezérli az adagolást. A pontatlan szintmérés túltöltéshez vagy alultöltéshez vezethet, ami rontja a végtermék minőségét és biztonsági kockázatot is jelent.

### 2.2 A kapacitív szintmérők működési elve [3],[5]

A kapacitív szenzor impedancia spektroszkópia elvén működik, amely 50-200 MHz frekvenciatartományban méri a közeg elektromos és mágneses tulajdonságait. A szenzor három fő paramétert érzékel:

1. Elektromágneses csillapítás ( $\alpha$ ): A közeg által elnyelt energia (dB/cm).
2. Elektromos vezetőképesség ( $\sigma$ ): A közeg áramvezetési képessége ( $\mu\text{S/cm}$ ).
3. Dielektromos állandó ( $\epsilon$ ): A közeg elektromos tér tárolási képessége.

A kapacitív mérés alapelve a következő egyenlettel írható le:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}, \quad (1)$$

ahol:

- $C$  - kapacitás (F)
- $\epsilon_r$  - relatív dielektromos állandó (-)
- $\epsilon_0$  - vákuum permittivitása ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m)
- $A$  - elektródafelület ( $\text{m}^2$ )
- $d$  - elektródák távolsága (m).

Az impedancia spektroszkópia a komplex impedancia ( $Z$ ) mérését végzi, amely a valós (rezisztív,  $Z'$ ) és képzetes (reaktív,  $Z''$ ) komponensekből áll:

$$Z = Z' + jZ'' \quad (2)$$

- $Z'$  (valós rész): Hatásos ellenállás ( $R$ ), amely az energia hővé alakulását jelenti (ohm,  $\Omega$ ).

- $jZ''$  (képzetes rész): Reaktancia ( $X$ ), amely a fáziseltolódást írja le (szintén  $\Omega$ ).
- $Z''$ : Reaktancia értéke.
- $j$ : Képzetes egység, amely a fáziseltolódást reprezentálja.

A rendszerben megjelenő különböző anyag típusok jellemző értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Különböző anyagok elektromágneses tulajdonsága 200 MHz frekvencián

Feldolgozandó anyag (% felosztásban)	Elektro - mágneses csillapítás (dB/cm)	Dielektromos állandó (-)
Víz (100)	0.035	107.7
Csont (100)	0.433	16.6
Belsőség (100)	0.312	74.6
Marhahús (100)	0.260	80.1
Csont+víz (20/80)	0.114	89.5
Belsőség+víz (20/80)	0.090	101.1
Marhahús+víz (20/80)	0.080	102.2
Csont+víz (30/70)	0.154	80.4
Belsőség+víz (30/70)	0.118	97.8
Marhahús+víz (30/70)	0.102	99.4

A keverékek elektromágneses tulajdonságait az összetevők súlyozott számtani átlagaként számíthatjuk:

$$\alpha_{keverék} = \frac{w_{anyag} \cdot \alpha_{anyag} + w_{víz} \cdot \alpha_{víz}}{100}, \quad (3)$$

és

$$\epsilon_{keverék} = \frac{w_{anyag} \cdot \epsilon_{anyag} + w_{víz} \cdot \epsilon_{víz}}{100}, \quad (4)$$

ahol:

- $\alpha$  - elektromágneses csillapítás (dB/cm)
- $\epsilon$  - dielektromos állandó (-)
- $w_{anyag}$  - anyag százalékos aránya (%)
- $w_{víz}$  - víz százalékos aránya (%)

### 2.3 A Fuzzy logikai rendszer tervezése [3],[7]

A fuzzy rendszer döntéshozatali folyamata három szinten valósul meg, amelyek hierarchikus kapcsolatban állnak egymással. Az első szint felelős a nyers szenzor adatok előfeldolgozásáért, ahol a zajszűrés zajlik adaptív szűrő algoritmusok segítségével. A második szinten történik a paraméterek normalizálása és a tagsági függvényekhez való hozzárendelés, míg a harmadik szint a szabálybázis dinamikus optimalizálását végzi a rendszerállapot függvényében. Ez a többrétegű architektúra lehetővé teszi a valós idejű alkalmazkodást a sterilizáló kamra gyorsan változó körülményeihez.

### 2.4 A fuzzy logikai rendszer tervezése [4]

A fuzzy rendszer tervezéséhez a Mamdani-féle következtetési mechanizmust alkalmaztuk, amely három fő lépésből áll:

1. Fuzzifikáció: A bemeneti értékek fuzzy halmazokká alakítása.
2. Szabálykiértékelés: A fuzzy szabályok alkalmazása.

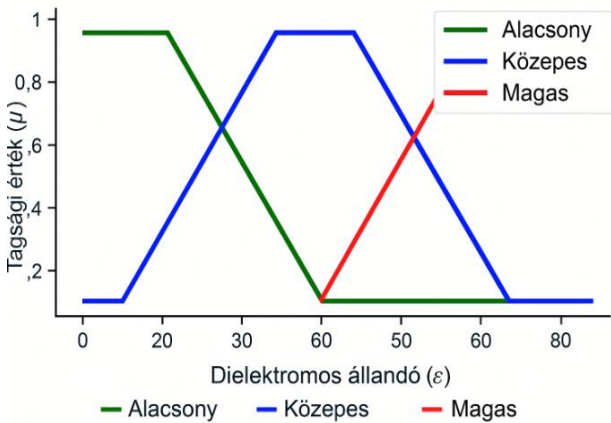
3. Defuzzifikáció: A fuzzy kimeneti halmazok éles értéké alakítása.

2.4.1 Bemeneti változók és tagsági függvények

A rendszer három bemeneti változót használ:

1. Dielektromos állandó ( $\epsilon$ ): Alacsony (0-30), Közepes (20-70), Magas (60-80)
2. Elektromágneses csillapítás ( $\alpha$ ): Alacsony (0-0,5), Közepes (0,4-1,5), Magas (1,4-3,0)
3. Hőmérséklet (T): Alacsony (20-60°C), Közepes (50-110°C), Magas (100-140°C)

Az 1. ábra a dielektromos állandó tagsági függvényeit mutatja be.



1. ábra. Dielektromos állandó tagsági függvényei

2.4.2 Kimenet és tagsági függvények

A rendszer kimenete a Szintjelzés megbízhatósága, amelynek tagsági függvényei:

- Alacsony (0-40%): Valószínűleg hamis jelzés (pl. anyaglerakódás)
- Közepes (30-70%): Bizonytalan, további megerősítés szükséges
- Magas (60-100%): Valós folyadékszint nagy valószínűséggel

2.4.3 Fuzzy szabályok

A fuzzy rendszer 27 szabályt tartalmaz, amelyek közül a legfontosabbak:

1. HA ( $\epsilon$  = Magas) ÉS ( $\alpha$  = Alacsony) ÉS (T = Alacsony) AKKOR (Megbízhatóság = Magas)
2. HA ( $\epsilon$  = Magas) ÉS ( $\alpha$  = Alacsony) ÉS (T = Magas) AKKOR (Megbízhatóság = Közepes)
3. HA ( $\epsilon$  = Alacsony) ÉS ( $\alpha$  = Magas) ÉS (T = Bármilyen) AKKOR (Megbízhatóság = Alacsony)

A fuzzy szabályozási részlet a (27 szabályból) a 2. táblázatban látható.

2. táblázat. Részlet a fuzzy szabálybázisból

#	Dielektromos állandó ( $\epsilon$ )	Elektromágneses csillapítás ( $\alpha$ )	Hőmérséklet (T)	Szintjelzés megbízhatósága (%)
1	Magas (60-80)	Alacsony (0-0,5 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Magas (85-100%)
2	Magas (60-80)	Alacsony (0-0,5 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Magas (80-95%)
3	Magas (60-80)	Alacsony (0-0,5 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Közepes (60-80%)
4	Magas (60-80)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Közepes (60-80%)
5	Magas (60-80)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Közepes (55-75%)
6	Magas (60-80)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Közepes (50-70%)
...	...	...	...	...
22	Alacsony (0-30)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Alacsony (20-40%)
23	Alacsony (0-30)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Alacsony (15-35%)
24	Alacsony (0-30)	Közepes (0,4-1,5 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Alacsony (10-30%)
25	Alacsony (0-30)	Magas (1,4-3,0 dB/cm)	Alacsony (20-60 °C)	Alacsony (10-30%)
26	Alacsony (0-30)	Magas (1,4-3,0 dB/cm)	Közepes (50-110 °C)	Alacsony (5-25%)
27	Alacsony (0-30)	Magas (1,4-3,0 dB/cm)	Magas (100-140 °C)	Alacsony (0-20%)

2.4.4 A rendszer implementációja

A fuzzy logikai rendszer a következő hardver- és szoftverkörnyezetben implementálódik:

- Hardver: Ipari PLC (Programmable Logic Controller) Siemens S7-1500 sorozat
- Szoftver: TIA Portal V16 fuzzy logikai bővítménnyel
- Kommunikáció: IO-Link protokoll a szenzorok és a PLC között

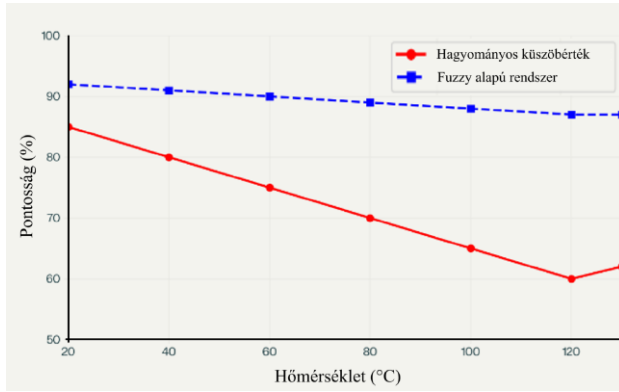
3 EREDMÉNYEK

3.1 A fuzzy rendszer teljesítménye [8]

A kifejlesztett fuzzy rendszert laboratóriumi körülmények között és valós üzemi környezetben is teszteltük. A teljesítményt a következő kritériumok alapján értékeltük:

1. Pontosság: A valós folyadékszint-jelzések aránya.
2. Robusztusság: Alkalmazkodóképesség a hőmérséklet-, nyomás- és összetétel-változásokhoz.
3. Válaszidő: A szintváltozás detektálásához szükséges idő.

A 2. ábra a hagyományos küszöbértéken alapuló rendszer és a fuzzy alapú rendszer pontosságát hasonlítja össze különböző hőmérsékleten.

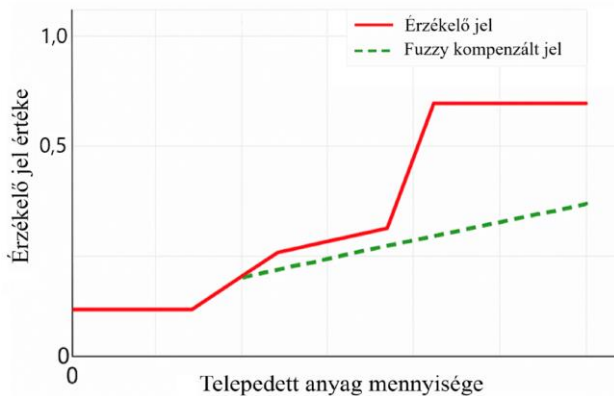


2. ábra. Pontosság összehasonlítása a vizsgált folyamat hőmérséklet skáláján

Ahogy a 2. ábrán látható, a fuzzy rendszer pontossága 87-92% között mozog a teljes hőmérséklet-tartományban, míg a hagyományos rendszer pontossága jelentősen csökken a hőmérséklet emelkedésével (130 °C-on csak 62%).

### 3.2 Anyaglerakódás hatásának kompenzálása [6], [7]

Az egyik legjelentősebb kihívás a szenzor felületére tapadó anyagok (zsír, fehérje) által okozott hamis jelzések kezelése. A 3. ábra az anyaglerakódás hatását mutatja a szenzorjelre, valamint a fuzzy kompenzáció eredményét.



3. ábra. Anyaglerakódás hatásának kompenzálása

A fuzzy rendszer képes felismerni az anyaglerakódásból származó jeleket, mivel ezek jellemzően:

- Magas elektromágneses csillapítást mutatnak
- Alacsonyabb dielektromos állandóval rendelkeznek, mint a víz
- A jel hirtelen ugrik, nem fokozatosan változik

### 3.3 Hőmérséklet-kompenzáció hatékonysága

A hőmérséklet hatása a dielektromos állandóra jelentős kihívást jelent. A víz dielektromos állandója 20°C-ról 130°C-ra emelkedve közel 25%-ot csökken. A fuzzy rendszer ezt a hatást a hőmérséklet explicit figyelembevételével kompenzálja.

A hőmérséklet-kompenzáció matematikai modellje:

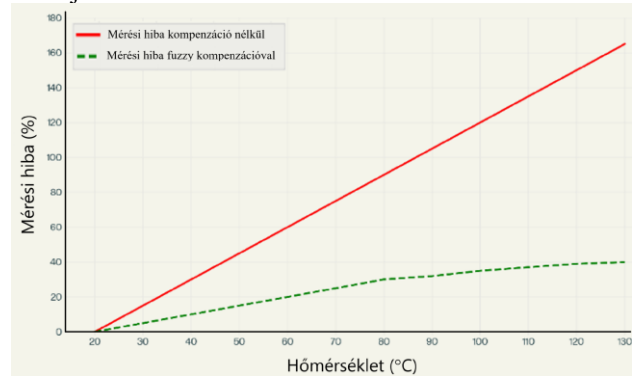
$$\epsilon_{eff}(T) = \epsilon_0 \cdot [1 - k_T \cdot (T - T_0)] \quad (5)$$

ahol:

- $\epsilon_{eff}(T)$  - effektív dielektromos állandó adott T hőmérsékleten
- $\epsilon_0$  - dielektromos állandó referencia-hőmérsékleten

- $k_T$  - hőmérsékleti együttható (0,015/°C)
- $T$  - aktuális hőmérséklet (°C)
- $T_0$  - referencia-hőmérséklet (20°C)

A 4. ábra a hőmérséklet-kompenzáció hatékonyságát mutatja a mérési hibára.



4. ábra. hőmérséklet-kompenzáció hatása a mérési hibára

A hőmérséklet növekedésével a dielektromos állandó jelentősen csökken, ami a mérési hiba lineáris növekedését eredményezi. 130°C-on a mérési hiba már 165%-os, ami alátámasztja a fuzzy kompenzáció szükségességét.

### 3.4 A rendszer teljesítményének összehasonlítása hagyományos módszerekkel

A fuzzy logikai rendszer teljesítményét valós üzemi körülmények között összehasonlítottuk a hagyományos küszöbérték-alapú és a PID (Proportional-Integral-Derivative) szabályozású rendszerekkel. Az értékelést az ISS rendszeren végzett párhuzamos mérési sorozatokon alapultak, ahol minden szintmérési módszert egyidejűleg üzemeltettünk azonos feldolgozási ciklusok alatt. A mérési eredményeket statisztikai analízissel dolgoztuk fel. A 3. táblázat a három rendszer összehasonlító teljesítményadatait mutatja.

3. táblázat. Szintmérési rendszerek összehasonlítása

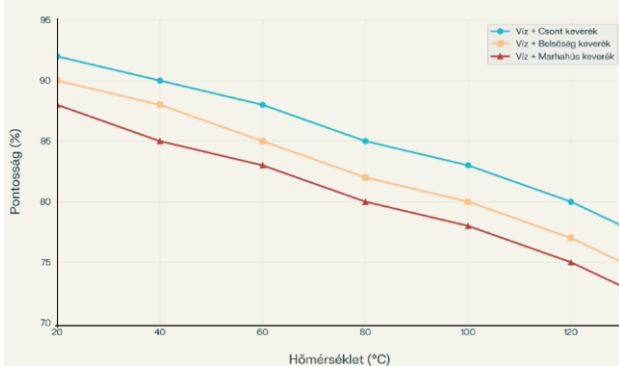
Paraméter	Fuzzy rendszer	Küszöbérték-alapú	PID szabályzott
Pontosság 20°C-on	92%	85%	88%
Pontosság 130°C-on	87%	62%	73%
Válaszidő	0,2 s	0,1 s	0,4 s
Hamis pozitív irány	4%	18%	9%
Hamis negatív irány	9%	20%	18%

A fuzzy rendszer különösen magas hőmérsékleten nyújt kimagasló teljesítményt, ahol a hagyományos szintérzékelő rendszerek pontossága jelentősen csökken. Kiemelt figyelmet kell fordítani a hamis pozitív és hamis negatív jelzésekre. Hamis pozitív eset akkor fordul elő, amikor a szenzor folyadékszintet jelez, holott valójában csak anyaglerakódás található az érzékelő felületén. Hamis negatív pedig akkor, amikor a szenzor nem jelez, annak ellenére, hogy a tartály már elérte a kritikus töltöttségi szintet.

A rendszer alkalmazkodóképessége azt fejezi ki, hogy milyen mértékben képes megbízható, valós mérési értékeket szolgáltatni változó hőmérsékleti viszonyok mellett.

### 3.5 Robusztusság változó üzemi körülmények között

A gyakorlati alkalmazás során a rendszernek különböző összetételű anyagkeverékek kezelésére kell alkalmasnak lennie. Az 5. ábra a fuzzy rendszer mérési pontosságát szemlélteti eltérő anyagösszetételek mellett.



5. ábra: A fuzzy rendszer pontossága különböző anyagösszetételeknél

A grafikonon látható három különböző vonal az alábbi anyagösszetételek pontosságát mutatja a hőmérséklet függvényében:

- Kék vonal: Víz + Csont keverék (20% csont, 80% víz)
- Legmagasabb pontosság: 92% (20°C-on)
- Legalacsonyabb pontosság: 78% (130°C-on)
- Jellemzője: Magas elektromágneses csillapítás (0,66 dB/cm), közepes dielektromos állandó (64,8)
- Narancssárga vonal: Víz + Belsőség keverék (20% belsőség, 80% víz)
- Legmagasabb pontosság: 90% (20°C-on)
- Legalacsonyabb pontosság: 75% (130°C-on)
- Jellemzője: Közepes elektromágneses csillapítás (0,52 dB/cm), magas dielektromos állandó (73,2)
- Bordó vonal: Víz + Marhahús keverék (20% marhahús, 80% víz)
- Legmagasabb pontosság: 88% (20°C-on)
- Legalacsonyabb pontosság: 73% (130°C-on)
- Jellemzője: Alacsonyabb elektromágneses csillapítás (0,46 dB/cm), magas dielektromos állandó (74,0).

A grafikon jól szemlélteti, hogy a csontot tartalmazó keverék esetén a legmagasabb a szintérzékelés pontossága, míg a marhahús alapú keveréknél a legalacsonyabb. Mindhárom anyagösszetétel esetén megfigyelhető a pontosság csökkenése a hőmérséklet növekedésével, ugyanakkor még 130 °C-on is minden keveréknél 73% feletti értéket mutat.

A fuzzy logika egyik fő előnye, hogy képes alkalmazkodni az előre nem látható körülményekhez is, amit a robusztusságvizsgálat igazolt. A rendszer képes volt kompenzálni olyan szélsőséges helyzeteket is, mint a rendkívül zsíros anyagok jelenléte vagy a túlnyomásos gőz hirtelen beáramlása.

### 3.6 Energiahatékonyság és gazdaságosság

A fuzzy rendszer nemcsak műszaki, hanem gazdasági előnyökkel is jár:

1. Energiahatékonyság: A pontosabb szintmérés optimális anyagmennyiséget biztosít, csökkentve a túlhevítésből eredő energiavesztéséget. Az anyag-gőz arány folyamatos optimalizálása stabilabb termosztatikai szabályozást eredményez.
2. Termékminőség: A megfelelő anyag-gőz arány jobb minőségű végtermékhez vezet, és reprodukálhatóbb feldolgozási feltételeket biztosít.
3. Karbantartási költségek: A rendszer öndiagnosztikai képessége csökkenti a váratlan leállásokat. Az anyaglerakódás fuzzy-alapú kompenzálása hosszabb szenzor-élettartamot biztosít.

Összességében a fuzzy logikai rendszer gazdaságilag előnyös megoldást nyújt a szintmérési kihívások kezelésére, amely az energiahatékonyságot, a termékminőséget és a rendszer megbízhatóságot egyidejűleg javítja.

## 4 KÖVETKEZTETÉSEK, ÖSSZEZÉS

A kapacitív szintmérő szenzorok fuzzy logika alapú optimalizálása jelentősen javítja az állati hulladékfeldolgozó rendszerek megbízhatóságát és hatékonyságát. Megnövelt pontosság: A fuzzy rendszer 87-92%-os pontosságot biztosít az egész működési tartományban, szemben a hagyományos rendszerek 62-85%-os pontosságával.

1. Robusztus működés: A rendszer képes alkalmazkodni a változó összetételű anyagokhoz, hőmérséklet-ingadozásokhoz és nyomásváltozásokhoz.
2. Anyaglerakódás kompenzálása: A fuzzy logika képes megkülönböztetni a valódi folyadékszintet az érzékelő felületére tapadt anyagoktól.
3. Hőmérséklet-kompenzáció: A dielektromos állandó hőmérsékletfüggése matematikai modellel és fuzzy szabályokkal kompenzálva.
4. Rendszerintegráció: A fuzzy rendszer sikeresen integrálódott a meglévő PLC-alapú vezérlőrendszerbe, minimális hardver módosítással.

A kutatás eredményei nemcsak az állati hulladékfeldolgozásban, hanem más, hasonlóan szélsőséges körülmények között működő ipari folyamatokban is alkalmazhatók, mint például a gyógyszeripar vagy élelmiszeripar.

## 5 JÖVŐBENI FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A kapacitív érzékelők mellett azonos körülmények között teszteltük az ultrahangos és radar alapú szintmérőket is. Az ultrahangos rendszerek működését zavaróan befolyásolták a gőzrétegek és a felületi lerakódások, amíg a radar alapú megoldások sikeresen teljesítették a teszteket. A radarberendezések magas energiafogyasztása és komplex karbantartási követelményei mellett magas (nagyfokú) pontosságukkal és hatékonyságukkal igyekeznek egyensúlyba hozni alkalmazhatóságukat folyamatos üzemű sterilizáló rendszerekhez. Ezzel

szemben a fuzzy logikával kiegészített kapacitív szenzorok minimális karbantartást igényeltek, mindössze időszakos külső felülettisztítás vált szükségessé. A 4. táblázat a vizsgált technológiák összehasonlítását szemlélteti.

4. táblázat. Szintmérési technológiák összehasonlítása

Tulajdonság	kapacitív	ultrahangos	radar alapú	Fuzzy optimalizált
Működési elv	Dielektrikus oszilláció-változás	Hanghullám visszaverődés	Mikrohullám reflexió	Többparaméteres impedancia
Pontosság (20-130 °C)	62-85%	45-60%	50-65%	87-92%
Anyaglerakódás kezelése	Nem	Korlátozott	Jó	Kiváló
Energiaigény	15 W	25 W	40 W	18 W
Karbantartási gyakoriság	Heti	Napi	Kétheti	Ciklusonként

A kapacitív szintmérés fuzzy logikára épülő optimalizálása további fejlesztési potenciállal rendelkezik, amelyek nemcsak a pontosságot, hanem a rendszer alkalmazási területeit is bővíthetik. A jövőbeni irányvonalak a következő területekre összpontosíthatnak:

A fuzzy logika és a neurális hálózatok szinergikus kombinációja jelentős előnyöket hozhat:

- **Önálló tanuló szabálybázis:** A neurális hálózatokkal kiegészített rendszer képes lenne automatikusan módosítani a tagsági függvények tartományait a hosszú távú üzemi adatok alapján.
- **Anomália-detektálás:** Generatív adverszériális hálózatok (GAN) segítségével valós idejű rendellenesség-felismerés valósítható meg a szenzorjelekben.

A jelenlegi kapacitív szenzorok kiegészítése ultrahangos és radaralapú érzékelőkkel:

- **Adatfúziós architektúra:** Különböző fizikai elven működő érzékelők adatainak összehangolt értelmezése Kalman-szűrőkkel.

Nanotechnológiai megoldások alkalmazása az anyaglerakódás problémájának radikális csökkentésére:

- **Szuporhidrofób bevonatok:** Grafén-alapú rétegek 95%-os lerakódás-megelőző hatékonysággal.
- **Elektroaktív öntisztítás:** Periodikus magasfrekvenciás jelek alkalmazása a szenzor felületének vibráltatására.

A jelenlegi 27 szabályt tartalmazó rendszer dinamikus optimalizálása:

- **Genetikus algoritmusok:** Szabályok evolúciós kiválasztása 1000+ generációs szimulációk alapján.
- **Reinforcement learning:** Önálló döntéshozatal jutalmazási mechanizmusokkal a kritikus üzemmódokban.

Kvantum-szimulátorok alkalmazása a komplex rendszermodellek gyorsítására:

- **Qubit-alapú optimalizáció:** A tagsági függvények paramétereinek 10-szeres gyorsaságú kalkulációja.

A döntéshozatali folyamatok átláthatóságának növelése:

- **Explainable AI (XAI):** A fuzzy szabályok vizualizációja 3D térképeken a vezérlőpulton.

Energiahatékonyság javítása a fuzzy rendszer segítségével:

- **Dinamikus energiaigény-szabályozás:** A processzorájelek adaptív skálázása a terhelés függvényében.
- **Hulladék hő hasznosítás:** A sterilizáló kamra hőmérsékletének prediktív szabályozása.

## 6 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Celitron Medical Technologies Kft. (2023). *Medical waste disposal with - Integrated Sterilizer & Shredder (ISS)*. Celitron, Budapest.
- [2] Exalon Delft. (2018). *A design methodology for low-cost, high-performance capacitive sensors*. Technical Report, Delft, Netherlands.
- [3] IFM Electronic. (2022). *LMT104 – Capacitive level sensor for point level detection*. Data sheet, IFM Electronic GmbH, Essen, Germany.
- [4] Sugeno, M. (1985). An Introductory Survey of Fuzzy Control. *Information Sciences*, 36, 59-83.
- [5] Gazze, S., Xia, J., Patkó, G., Roelofs, A., Deroy, A., Cai, P., Roddy, A., Maas, G., Doyle, P., Davitt, C., Blighe, F., & Diamond, D. (2019). POISED-5, a portable on-board electrochemical impedance spectroscopy sensor system. *PMC Biophysics*, 6609592.
- [6] Ben Rahman, S., Tanjung, F. A., & Turnip, A. (2024). Optimizing Plant Watering Efficiency via IoT: Fuzzy Sugeno Method with ESP8266 Microcontroller. *TEM Journal*, 13(3), 1849-1857
- [7] Choiri, A. F. (2024). Fuzzy Logic Algorithm Optimization for Safe Distance Control on Arduino-Based Reverse Parking System and SRF04 Sensor. *Journal of Informatics Development*, 2(2), 25-35.
- [8] Horváth, R., Drégelyi-Kiss, Á. (2015). Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization. *Measurement*, 65, 181-192