

Ipari mikrobiológiai folyamatok fajlagos energia fogyasztása – a takarékos energiafelhasználás járható utjai

Specific energy consumption of industrial microbiological processes – feasible ways of economical energy use

*Drd. BARTHA Csaba¹, Drd. JIPA Monica¹, Drd. TÓKOS Attila¹, Dr. VOINA Andreea²,
Dr. CARAMITU Alina², Dr. LINGVAY József^f*

¹ Research-Development Institute for Environmental Protection Technologies and Equipment – ICPE Bistrița SA,
Str. Parcului, Nr. 7, 420035, Bistrița, BN-RO,
E-mail: icpe@icpebn.ro , csaba.bartha@icpebn.ro,
Fax: +40 263 210938, <https://www.icpebn.ro/en>

² National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA,
Splaiul Unirii Nr. 313, 030138 București sector 3, RO,

E-mail: office@icpe-ca.ro; andreea.voina@icpe-ca.ro , Fax: 40-21-346.82.99, <http://www.icpe-ca.ro>

Abstract

Given the wide application of microbiological processes, we analyzed the possibilities of reducing their specific energy consumption. A new, original technical solution has been developed, according to which the metabolism, growth and reproduction of the microorganisms are significantly accelerated as a result of a ELF electric field. The comparative measurement on the experimental equipment showed, that with the developed solution, under industrial conditions, the specific energy consumption of the microbiological processes is approximately halved.

Keywords: biotechnology, energy consumption, biostimulation, ELF, wastewater treatment, algal production

Kivonat

Tekintettel a mikrobiológiai folyamatok széles körű alkalmazására, elemeztük ezek fajlagos energiafogyasztásának csökkentési lehetőségeit. Új, eredeti műszaki megoldást lett kidolgozva mely szerint az ELF elektromos tér hatására a mikroorganizmusok metabolizmusa, növekedése és szaporodása számottevően felgyorsul. A kísérleti berendezésen végzett komparatív mérések kimutatták, hogy a kidolgozott megoldással, ipari körülmények között a mikrobiológiai folyamatok fajlagos energiafogyasztása kb. felére csökken.

Kulcsszavak: biotechnológia, energiafogyasztás, biostimuláció, ELF, szennyvízkezelés, algatermesztés

1. BEVEZETŐ

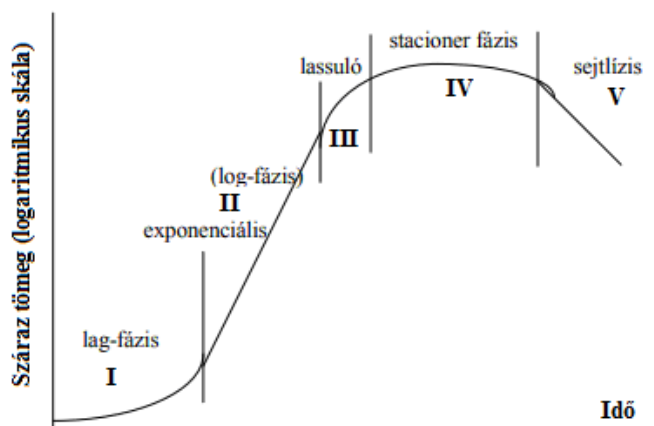
Az ipari folyamatok fajlagos energiafogyasztása nagymértékben meghatározza a termelési árakat. A villamos energia termelése és szállítása számottevő költségeket feltételez. Ugyanakkor, a villamos energia termelésének, szállításának és felhasználásának számottevő negatív kihatásai vannak a természetre. Ezekre való tekintettel megállapítható, hogy mindazok a kutatások és fejlesztések, amelyek a fajlagos energiafogyasztást célozzák meg gazdasági és környezetvédelmi szempontból fontosak, állandó jelleggel aktuálisak. Ezekre való tekintettel, dolgozatunk célja elemezni egyes ipari mikrobiológiai folyamatok fajlagos energiafogyasztását és bemutatni egy eredeti módszert, amellyel az energiafogyasztás számottevően csökkenthető.

2. IPARI MIKROBIOLÓGIAI FOLYAMATOK ENERGIAFOGYASTÁSA

Tekintettel arra, hogy a biotechnológiai folyamatok enzimek által katalizált biokémiai reakciókat feltételez elvileg, ezek energiaszükséglete általában kisebb kéne legyen, mint a klasszikus vegyi folyamatok

esetében. A biokémiai reakciók általában 50°C alatt mennek végbe és sebességük általában sokkal kisebb, mint a vegyi folyamatoké. A relatív alacsony reakciósebességre való tekintettel, adott végtermék mennyiség előállítása aránylag hosszú kezelési időt feltételez. Ebből kifolyólag az energiafogyasztás számottevően megnő (hosszabb keverési idő, a reagensek recirkulációja stb.).

A mikroorganizmusok növekedésének fázisai (folytonosan kevert folyékony táptalajon) az 1. ábrán vannak bemutatva.



1. ábra. A mikroorganizmusok növekedése folytonosan kevert folyékony táptalajon

Az 1. ábrából megállapítható, hogy folytonos keverésnél a mikroorganizmusok növekedését (biomassza szaporodása) 5 fázis jellemzi.

Amikor a mikroorganizmusokat friss tápoldatba helyezik a sejtnövekedés és sejtszótadás nem indul rögtön el – az élő sejteknek időre van szükségük arra, hogy alkalmazkodjanak az új környezethez és tápanyaghoz (aminek a metabolizmusa esetenként új enzimeket igényel). Ez az I., úgynevezett nyugvó periódus vagy LAG fázis, időtartalma aránylag nagy, gyakorlatilag a globális folyamat sebesség-meghatározó folyamat. Miután az adaptáció és/vagy az új enzimek szintézise megtörtént, a baktériumok a genetikai potenciáljuk (DNS-tartalom) és a tápoldat energiatartalma által meghatározott maximális rátával osztódnak és szaporodnak egy adott közegben. A biomassa (végtermék) exponenciálisan nő és a tápanyag arányosan csökken – II. exponenciális (LOG) fázis. Amikor a tápanyag koncentrációja egy adott határértékre csökken, a biomassa növekedés lelassul (III. – lassuló fázis), majd beáll egy stacioner fázis (IV.) amikor biomassa növekedés nincs (tápanyaghiány). Mindezek után következik a sejtek elhalálása (V. – sejtlízis), amikor gyakorlatilag a biomassa tömege csökken.

Megállapítható, hogy egy adott ipari mikrobiológiai folyamat globális reakciósebességét gyakorlatilag a LAG fázis ideje határozza meg. Ugyancsak megállapítható, hogy a folyamatot célszerű leállítani és a végterméket kivonni (begyűjteni) a III. lassuló fázisban.

3. A TAKARÉKOS ENERGIAFELHASZNÁLÁS JÁRHATÓ UTJAI – BIOSTIMULÁCIÓ

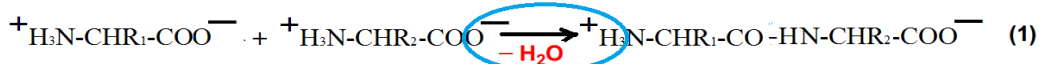
Tekintettel a fentiekre, megállapítható, hogy az ipari mikrobiológiai folyamatok energiaszükséglete csökkenthető és a berendezések termelékenysége számottevően növelhető ha bármilyen módon csökkentjük a LAG periódus idejét – azaz stimuláljuk a sejtek adaptációját és a metabolizmushoz szükséges enzimek szintézisét. Erre a célra különböző biostimulátorok voltak (vannak) kifejlesztve, amelyek alkalmazásával a LAG fázis ideje akár 25%-al is csökkenthető [1-3].

A közelmúltban számos tanulmány beszámol arról, hogy a mikroorganizmusok metabolizmusa és fejlődése / növekedése számottevően felgyorsul az extrém alacsony frekvenciájú elektromos tér (ELF) hatására [4-11].

3.1. A mikroorganizmusok metabolizmusának stimulációja elektromágneses térben

Dielektromos spektroszkópia módszerével, kísérletileg ki volt mutatva, hogy adott/diszkrét frekvenciájú az 1-500Hz frekvenciasávban (extrém alacsony frekvenciartomány – ELF – *extremely low frequency*) elektromos terek hatására az élő sejtekben lezajló biokémiai folyamatok kinetikája megváltozik. Ezek az „érzékeny” frekvenciákon a biomassa dielektromos veszteségei ($tg\delta$) meredek változásokat mutatnak, ami a

közeg vezetőképességének és dielektromos permittivitásának hirtelen változásaira utal [4, 9-11]. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy, ezeken a frekvenciákon, az elvileg elektrolitikus közeg (II rendű elektromos vezető) polarizált gyöktartalma (koncentrációja) hirtelen megváltozik – felgyorsulnak egyes kondenzációs reakciók (1):

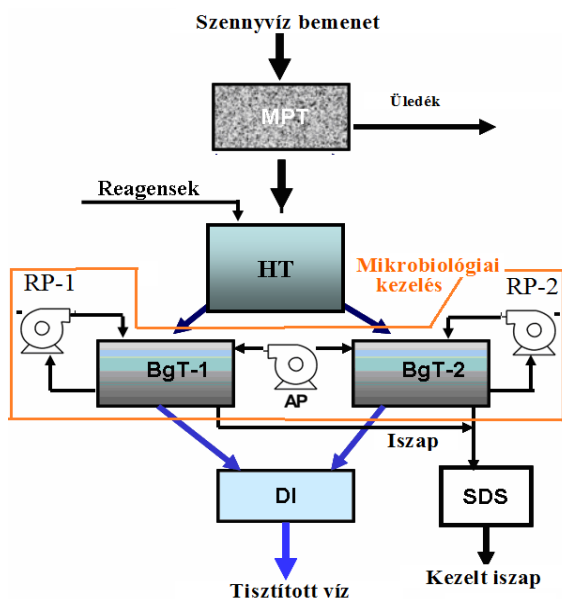


Az (1)-ből megállapítható, hogy kettő aminosav molekula (4 szabad gyök – 2 x NH_3^+ és 2 x COO^-) kondenzációja után egy proteinmolekula keletkezik (2 szabad gyök – 1 x NH_3^+ és 1 x COO^-) és ezáltal a közeg vezetőképessége és a dielektromos permittivitása számottevően csökken, ami a $tg\delta$ hirtelen változását eredményezi [9]. Egy eredeti műszaki megoldás lett kidolgozva az „érzékeny frekvenciák” gyors meghatározására [21]

Kísérletileg ki lett mutatva, hogy a feketepenyész (*Aspergillus niger*) növekedési sebessége és spóratermelése megduplázódik az $50 \pm 0,2$ Hz elektromos tér hatására [12]. Ugyancsak ki lett mutatva, hogy a szennyvíztelepek aktív iszapjának bakteriális flórájának metabolizmusa számottevően felgyorsul az $50 \pm 0,2$ Hz és a $99,9 \pm 0,4$ Hz, $5 \div 8$ V/m elektromos tér hatására [10, 11]. Ki lett mutatva, hogy az $50 \pm 0,2$ Hz elektromos tér gyorsítja a sejtosztódást, viszont a $99,9 \pm 0,4$ Hz elektromos térnek nincs hatása a sejtosztódásra [11].

3.2. A szennyvíztelepek fajlagos energiafogyasztásának csökkentése

Az ipari szennyvízkezelés egyszerűsített elvi vázlata a 2. ábrán van bemutatva. A mechanikailag kezelt (MPT - ülepítés, szűrés – homok, salak, nagyobb méretű szilárd szennyeződések eltávolítása) szennyvíz egy tartályba HT van pompákkal áttemelve ahol – állandó keverés közben – pH javító és flokkuláló reagensek vannak adagolva. Ezután a vegyileg kezelt szennyvíz automatikusan vezérelt pompákkal át vannak vezetve a biológiai kezelés reaktoraiba (BgT-1 és BgT-2) ahol az aktív iszap mikroorganizmusai lebontják a szennyező komponenseket (szerves anyagok, foszfátok, nitrátok, ammónia stb.). A biológiailag tisztított vízből leüleptik az elhalt biomasszát (iszapot), szűrik, és fertőtlenítés után kivezetik a felszíni vizekbe. .

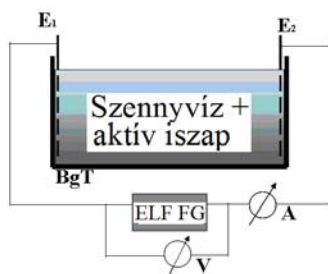


- MPT – mechanikai kezelés (szedimentáció, szűrés);
- HT – vegyi kezelés (pH korrekció, flokkuláció);
- BgT-1 és BgT-2 – recirkuláló pompák;
- AP – levegőpumpa/kompresszor;
- DI – fertőtlenítés;
- SDS – iszapkezelés (szűrés, szárítás stb.).

A szennyvíztelepek főbb elektromos fogyasztói: víz és iszappompák, levegőkompresszor, elektromágneses szelepek, automatizálási berendezések stb. A szennyvíztelepek kapacitásának, az alkalmazott technológia és a kezelt víz szennyezettségének függvényében, világviszonylatba, a fajlagos energiafogyasztása $0,24 \text{ kWh/m}^3 \div 2,8 \text{ kWh/m}^3$ [12-19].

Tekintettel arra, hogy a biológiai folyamatok lassúak, a recirkuláló pompákat, a levegőkompresszort valamint a BgT-1 és BgT-2 mechanikai keverőit addig kell üzemeltetni ameddig, a kezelt vízben a szennyeződések szintje (koncentrációja), a megengedett határok alá csökken. Gyakorlatilag ez oda vezet, hogy a szennyvíztelepek összes energiafogyasztásának több mint 60% a mikrobiológiai kezeléseknél tulajdonítható [14, 16, 18, 20].

A fentiekre valamint a [9-11, 21] leírtakra egy eredeti műszaki megoldás lett kidolgozva, amely által a mikrobiológiai vízkezelés időtartalma kb. felére csökkenthető [22, 23]. A megoldás [22] abban áll, hogy a szennyvíztelep bioreaktorába két párhuzamosan beépített elektródára egy adott feszültségű és frekvenciájú (a [21] szerint meghatározott) ELF feszültség van kapcsolva, ami az aktív iszapon $5\div 8$ V/m elektromos teret képez. Az ELF elektromos tér hatására az aktív iszap mikroorganizmusainak a metabolizmusa felgyorsul és ez által a vízben levő szennyező vegyületek lebontásának (semlegesítésének) ideje számottevően lerövidül. Az eljárás elve a 3. ábrán van bemutatva.

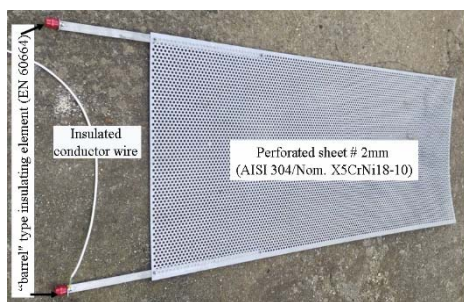


- E1 és E2 - elektródák;
- BgT – biokémiai reaktor;
- ELF-FG – ELF feszültség generátor;
- A – Amperméter;
- V – Voltmérer.

1. ábra. Az aktív iszap mikroorganizmusainak stimulálása ELF elektromos térben

A [22] szerinti megoldásnál lényeges szempont az E1 és E2 elektródák anyaga. Az elektródákat olyan elektromosan vezető anyagból kell készíteni, amelynek komponensei nem oldódnak ki az ELF váltóáramú polarizáció hatására. Kísérletileg ki lett mutatva, hogy a nagy szilícium tartalmú öntöttvas [24] és az AISI 304 rozsdamentes acél oldódása adott körülmények között elhanyagolható – tehát a célnak megfelelnek.

A [22] megoldás hatékonysága ipari körülmények között volt megvizsgálva. E célból egy már üzemben levő szennyvíztelep egyik bioreaktora fel volt szerelve a 3. ábra szerint és, üzemeltetés közben, komparatív vegyi vizsgálatokkal követtük az 1. ábra szerinti BgT-1 (referencia) és BgT-2 (ELF elektromos térben stimulált) bioreaktorokon a kimenő víz szennyezettségét azonos üzemi paramétereknél (hőmérséklet, hozamok, bemenő szennyezettség stb.). A 4. ábrán az ipari kivitelezés néhány részlete van bemutatva.



Az elektródák



Az elektródák rögzítése



Az ELF feszültség generátor

2. ábra. Az ipari kivitelezés néhány részlete [23, 25]

A komparatív vegyi vizsgálatok eredményei az 1. táblázatban vannak megadva.

A komparatív vegyi vizsgálatok eredményei

1. táblázat

Próba	Paraméter							
	LDO [mg/L]		COD [mg/L]		N-NH [mg/L]		P _t [mg/L]	
Hőmérséklet [°C]	4	14	4	14	4	14	4	14
Bemenő szennyvíz	0	0	1230	1550	34,7	41,2	5,2	5,9
BgT-1 (referencia) kiment	4,2	4,3	123	121	16,1	15,0	2,1	2,0
BgT-2 (stimulált) kiment	7,9	8,1	45,3	46,5	9,1	8,2	0,9	1,1
Megengedett határérték	-	-	125	125	15	15	2	2

Az 1. táblázat adatainak elemzéséből megállapítható, hogy azonos üzemeltetési körülmények között, az ELF elektromos térrel stimulált bioreaktorból kijövő kezelt víz szennyezettség tartama sokkal kisebb, mint a referencia értékek (BgT-1 kimenet). Az eredmények arra utalnak, hogy az ELF elektromos térrel stimulált mikroorganizmusok [23], még alacsony hőmérsékleten is (4°C – téli körülmények) kb. kétszer gyorsabban

bontanak le azonos mennyiségű szennyező anyagot mint a nem stimuláltak (referencia). Erre való tekintettel megállapítható, hogy ELF elektromos térrel a mikrobiológiai víztisztítás időtartalma kb. felére csökkenthető, ami a szennyvíztelep globális energiafogyasztásánál kb. 30% megtakarítást eredményez.

3.3. A mikroalgák növekedésének serkentése elektromágneses térben

A mikroalga biomasszák (elsősorban *Chlorella*, *Spirulina* és *Dunaliella*) magas hozzáadott értékű, a világpiacon nagyon keresett termékek [26, 27]. A mikroalgákat nagyméretű fotobioreaktorokban termesztik – ezek termelékenysége jelenleg kisebb, mint 52,5 g/m²/zi [28]. Elvileg a mikroalga növekedési sebességét az 1. ábrán bemutatott diagram szerint a LAG periódus határozza meg. A [26, 27] és főleg a [8, 10, 11] következtései azt sugallják, hogy a mikroalga termesztésre használt fotobioreaktorokban a termelékenység számottevően növelhető, ha a sötétben és a fény hatására végbemenő biokémiai folyamatok megfelelő „érzékeny” frekvenciájú ELF elektromos térrel vannak stimulálva. Mai ismeretek alapján, egy erre alkalmas berendezés kivitelezésének két nagy kihívása van:

- a polarizációs elektródák anyagának kiválasztása - elektrolitikusan oldódó fém nem lehet (szennyezi a végterméket), az arany esetleg platina túl drága;

- a növekedés fázisaiban, sötétben és megvilágításnál, folyamatosan meghatározni az „érzékeny” frekvenciákat (amelyek különböznek az adott fázisban végbemenő biokémiai folyamatok függvényében).

Ezeknek a kihívásoknak a megoldásán, valamint egy elektromos térben stimulált nagy termelékenységű mikroalga termelő automata berendezés kifejlesztésén csapatunk jelenleg dolgozik – reméljük a közeljövőben közölhetünk részletes eredményeket.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Tekintettel a mikrobiológiai folyamatok széles körű alkalmazására, elemeztük ezek fajlagos energiafogyasztásának csökkentési lehetőségeit.

Új, eredeti műszaki megoldást lett kidolgozva mely szerint az ELF elektromos tér hatására a mikroorganizmusok metabolizmusa, növekedése és szaporodása számottevően felgyorsul. Egy üzemben levő szennyvíztelepen kivitelezett kísérleti berendezésen végzett komparatív mérések kimutatták, hogy a kidolgozott megoldással, ipari körülmények között, a mikrobiológiai folyamatok fajlagos energiafogyasztása kb. felére csökken.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Dolgozatunkat a Romániai Oktatási és Kutatási Minisztérium (CCCDI - UEFISCDI) támogatta anyagilag a PN III-PTE tudományos program keretében - kutatási szerződések: PTE/2020-012 „ESELFBio” és PTE-2021-0075 „EPSμALG”.

6. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Pascu D.E., Modrojan C., Miron A.R., Albu P.C., Clej D.D., Pascu (Neagu) M., Caprarescu S., *Use of Mathematical Modelling in Water and Wastewater Area*, Rev. de Chim. (Bucuresti), 2015. 66 (12), 1950-1955.
- [2] Nwankwegu A.S., Zhang L., Xie D.T., Onwosi C.O., Muhammad W.I., Odoh C.K., Sam K., Idenyi J.N., *Bioaugmentation as a green technology for hydrocarbon pollution remediation. Problems and prospects*, Journal of Environmental Management, 2022. 304, 114313, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114313>
- [3] Gherman V. D., Molnar P., Motoc M., Negrea A., *Pretreatments testing of high biodiversity inocula with simultaneous biohydrogen production and wastewater treatment*, Rev. Chim., 2018. 69 (4), 806-808.
- [4] Lingvay M., Caramitu A. R., Borş A. M., I. Lingvay, *Dielectric spectroscopic evaluation in the extremely low frequency range of an Aspergillus niger culture*, Studia UBB Chemia, 2013. 64 (2 Tom 1), 279-288.
- [5] Stancu C., Lingvay M., Szatmari I., Lingvay I., *Influence of 50 Hz electromagnetic field on the yeast (Saccharomyces cerevisiae) metabolism*, The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), IEEE Xplore, Bucharest, 2013. DOI: 10.1109/ATEE.2013.6563449
- [6] Sandu D., Lingvay I., Lányi S., Micu D. D., & al., *The effect of electromagnetic fields on baker's yeast population dynamics, biocatalytic activity and selectivity*, Studia UBB Chemia, 2009. 54 (4), pp. 195-201.
- [7] Lingvay M., Stancu C., Szatmári I., Lingvay I., *The influence of 50 Hz electric field to dielectric permittivity of yeast (Saccharomyces cerevisiae) suspensions*, Electroteh., Electronica, Automatica (EEA), 2013. 61 (1), 43-47.

- [8] Ferencz C. M., Petrovszki P., Dér A., Sebök-Nagy K., Kóta Z., Páli T., *Oscillating electric field measures the rotation rate in a native Rotary enzyme*, 2017. Sci. Rep., 7 (45309).
- [9] Bartha C., Caramitu A. R., Jipa M., Ignat D. M., Tókos A., *Dielectric behavior of sludge from wastewater treatment*, Studia UBB Chemia, 2020. 65 (4), 85-93.
- [10] Bartha C., Jipa M., Caramitu A.R., Voina A., Tókos A., Círciumaru G., Micu D.D., Lingvay I., *Behavior of Microorganisms from Wastewater Treatments in Extremely Low-Frequency Electric Field*, Biointerface Resarch in Applied Chemistry, 2021. 12 (4), 5071 – 5080.
- [11] Tókos A., Bartha C., Jipa M., Micu D.D, Caramitu A.R., Lingvay I., *Interactions of Extremely Low-Frequency Electric Field with the Active Sludge Live Materia from Wastewater Treatments*, 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2021, DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425187.
- [12] Radu E., Lipcinski D., Tănase N., Lingvay I., *The influence of the 50 Hz electric field on the development and maturation of Aspergillus niger*, Electrotehnica , Electronica, Automatica (EEA), 2015. 63 (3), 68-74.
- [13] Yapicioğlu P. S., *Energy cost estimation for a dairy wastewater treatment plant in terms of organic load*, Academic Perspective Procedia, 2019. 2 (3), 859-864.
- [14] Tókos A., Bartha C., Micu D. D., Jipa M., Nascu I., Lingvay I., *Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants*, 9th Int. Conf. on Modern Power Systems, IEEEExplore, 2021, Doi: 10.1109/MPS52805.2021.9492616
- [15] Torregrossa D., Leopold U., Hernández Sancho F., Hansen J., *Machine learning for energy cost modelling in wastewater treatment plants*, J. Environ. Manage, 2018. 223, 1061-1067,
- [16] Bartha C., Jipa M., Ignat D. M., Tókos A., Lingvay I., *The energy efficiency of domestic wastewater treatment processes: case analysis*, Electroteh. Electron. Autom, 2020. 68 (4), 30-36.
- [17] Castellet Viciano & al., *The relevance of the design characteristics to the optimal operation of wastewater treatment plants: energy cost assessment*, J. Environ. Manage, 2018. 222, 275-283.
- [18] Tókos A., Micu D.D., Caramitu A.R., Nascu I., Bartha C., Jipa M., Marin D., Lingvay I., *Long-term Energy Analysis of a Wastewater Treatment Plant with Biogas Production - Case Analysis*, 9th International Conference on Modern Power Systems (MPS), IEEEExplore 2021, Doi: 10.1109/MPS52805.2021.9492535 .
- [19] Shen Y., Linville J. L., Urgan Demirtas M., Mintz M. M., Snyder S. W., *An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs*, Renew. Sust. Energ. Rev, 2015. 50, 346-362.
- [20] Bumbac C., Manea E., Banciu A., Stoica C., Ionescu I., Badescu V., Nita-Lazar M., *Identification of physical, morphological and chemical particularities of mixed microalgae- bacteria granules*, Rev. Chim., 2019. 70 (1), 275-277.
- [21] Lingvay I., Radu E, Caramitu A. R., Mitrea S., Oprina G., Voina A., *Procedeu pentru determinarea frecventelor reprezentative in comportarea celulelor microbiene si algale*, OSIM Nr. A/00091/09.02.2016. - RO-BOPI 8/2017
- [22] Bartha C., Tókos A., Caramitu A.R., Voina A, Jipa M., Vlad G., Lingvay I., *Procedeu de stimulare a nămolului biologic și bioreactor pentru epurarea biologică a apelor reziduale*, OSIM nr. 0087/08.12.2020.
- [23] Tókos A., Jipa M., Círciumaru G., Bartha C., Voina A., Caramitu A.R., Micu D.D., Lingvay I., *Contributions to Energy Saving in Wastewater Treatment Plants*, 2022 International Conf. on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, 20-22 July 2022, DOI: 10.1109/ICECET55527.2022.9872736
- [24] Bartha C., Marinescu V., Jipa M, Sbarcea B-G., Tókos A., Caramitu A.R., Lingvay I, *Behavior in ac polarization of high-silicon cast irons*, Studia UBB Chemia, 2021. LXVI, 1, 49-61.
- [25] Tókos A., Jipa M., Marinescu V., Bartha C., Caramitu A. R., Lingvay I., *Electromagnetically stimulation of microbial activity in wastewater treatment- experimental equipment*, Electroteh. Electron. Autom.(EEA), 2021. 69 (2), 45-52.
- [26] Geada P., Rodrigues R., Loureiro L., & al., *Electrotechnologies applied to microalgal biotechnology – Applications, techniques and future trends*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 94, 656-668
- [27] Medeiros Bauer L., & al., *Growth stimulation and synthesis of lipids, pigments and antioxidants with magnetic fields in Chlorella kessleri cultivations*, Bioresource Technology, 2017. 244, 1425–1432
- [28] Clippinger J., Davis R., *Techno-Economic Analysis for the Production of Algal Biomass via Closed Photobioreactors: Future Cost Potential Evaluated Across a Range of Cultivation System Designs*. NREL/TP-5100-72716. 2019. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72716.pdf>