

POKAZATELJI RADA UREĐAJA ZA AERACIJU U POSTROJENJIMA ZA TRETMAN OTPADNIH VODA

PROCESS PARAMETERS OF AERATION EQUIPMENT FOR TREATMENT OF WASTE

Nikola KARLIČIĆ*, Aleksandar JOVOVIĆ, Dejan RADIĆ, Marko OBRADOVIĆ,
Dušan TODOROVIĆ, Miroslav STANOJEVIĆ,
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija

Razvoj i širenje primene postupaka aerobne biološke obrade gradskih i industrijskih otpadnih voda praćen je razvojem opreme za aeraciju koja se koristi u ovim procesima. Postrojenja za aerobnu biološku obradu otpadnih voda odlikuju se velikim utroškom energije za aeraciju zbog čega se posebna pažnja mora posvetiti izboru adekvatnog aeracionog sistema. Danas postoji veliki izbor različitih tipova uređaja za aeraciju za koje proizvođači definišu određene parametre koji se odnose na kapacitete, dimenzije, otpore strujanju, efikasnost prenosa kiseonika, sklonost zaprljanju i sl. Ovi parametri su osnova za izbor određene konstrukcije i broja distributera vazduha, kao i izbor ostale opreme (kompresorskih postrojenja, sistema cevovoda, zaporne i regulacione armature i slično). U cilju definisanja pristupa za poređenje distributera vazduha različitih konstrukcija u radu su analizirani osnovni pokazatelji njihove efikasnosti.

Ključne reči: distributeri vazduha; otpadna voda; biološki aerobni tretman

Development and expansion of application of biological treatment processes for municipal and industrial waste water were followed with development of aeration equipment. All plants for biological aerobic treatment of waste water involve high energy consumption for aeration, and therefore special care has to be committed to choice of adequate aeration system. There is a large offer of various types of aeration facilities in the market. Producers define certain parameters: capacities, overall dimensions, flow resistances, oxygen transfer efficiency, soil tendency. These are basic parameters for selection aeration system construction and selection of secondary equipment (compressor plants, pipe systems, seal and dosing valve, etc.). In the paper were analyzed the basic parameters of aeration equipment efficiency.

Key words: air distributors; waste water; biological aerobic treatment

1 Uvod

Za aerobno biološko prečišćavanje otpadnih voda pored bioaeracionih bazena sa kontinualnim radom u primeni su: sekvencijalni šaržni reaktori (SBR), membranski bioreaktori (MBR), membranski bioreaktori sa biofilmom i aeracijom (MABR) i druge vrste postrojenja. U svim navedenim postrojenjima potrebno je obezbediti odgovarajuću količinu kiseonika (vazduha) za proces aerobne biološke obrade.

Karakteristični parametri procesa za različite aeracione sisteme su: kapacitet unošenja kiseonika ($\text{kg O}_2/\text{h}$); opterećenje bioaeracionog bazena (reaktora) organskim materijama svedeno na jedinicu zapremine ($\text{kg BPK}/\text{m}^3\cdot\text{dan}$); opterećenje aktivnog mulja tj. odnos organskih materija i suve mase mulja ($\text{kg BPK}/\text{kg SM}\cdot\text{dan}$); trajanje procesa aeracije (h), količina mulja koja se recirkuliše iz taložnika (%); efekat sniženja BPK (%).

U radu su razmatrani pokazatelji rada i efikasnosti sistema dubinske aeracije. Osnovna prednost dubinske aeracije sastoji se u mogućnosti regulacije protoka vazduha prema potrebi što omogućava smanjenje potrošnje energije. Pored toga kod ovih sistema obezbedjena je sigurnost u radu u zimskim uslovima tj. nema opasnosti od zamrzavanja instalacija.

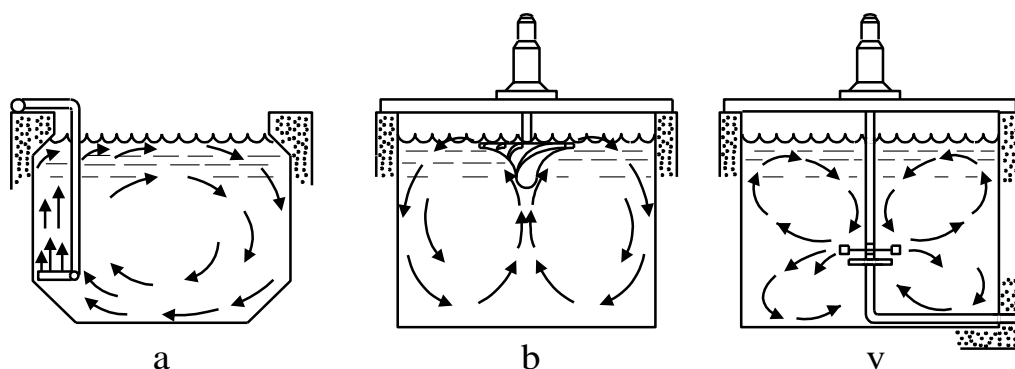
* Corresponding author, e-mail: nkarlicic@mas.bg.ac.rs

2 Karakteristike i podele distributera vazduha

Pri projektovanju procesa i opreme vrše se: izbor metoda i opreme za aeraciju, analiza projektnih podataka za aeratore, analiza karakteristika industrijskih postrojenja u radu.

Postoji više kriterijuma sistematizacije uređaja za aeraciju u postrojenjima za biološku preradu otpadnih voda.

Za uvodjenje vazduha u aeracione bazene koriste se dubinska ili aeracija pod pritiskom i površinska ili mehanička aeracija. Sistemi za dubinsku aeraciju se sastoje od kompresora i potopljenih distributera kroz koje se vazduh u vidu mehurova uvodi u bioaeracione bazene. Površinska aeracija se odvija uz pomoć turbinskih aeratora koji mehaničkim putem ostvaruju kontakt okolnog vazduha sa površinom vode u bazenu. Postoje i kombinacije ovih sistema aeracije, kao i varijante potopljenih turbinskih aeratora sa usisavanjem vazduha. Na Slici 1 prikazani su sistemi za aeraciju vazduhom, a u Tabeli 1 neke njihove opšte karakteristike.



Slika 1 Sistemi za aeraciju: a - dubinska aeracija uz pomoć distributera vazduha; b - površinska aeracija; v - kombinovana aeracija [1]

Distributeri vazduha se izrađuju od različitih materijala kao što su: nerdjajući čelik, keramika, porozna plastika, termoplastični materijali, elastomeri i dr (Tabela 1.).

Prema vrsti materijala i konstrukcionih rešenja moguća je podela distributera na: porozne, sa različitim perforacijama, turbularne (cevne) i mlazne. Porozni distributeri se izrađuju od različitih poroznih materijala (keramičkih ploča, poroznih cevi od keramičkih i plastičnih materijala). Distributeri sa perforacijama su u obliku cevi, ploča ili membrana sa prorezima ili otvorima. Pri strujanju vazduha kroz porozne i distributere sa perforacijom formiraju se mehurovi različite veličine. Kod turbularnih distributera ulazna struja vazduha izaziva cirkulaciju suspenzije i vazduha unutar tela distributera. Mlazni distributeri su injektorskog tipa i u njima se vrši mešanje vazduha i vode unutar mešne komore mlaznika.

Podela distributera prema obliku je na pločaste, cevne, kupolaste i distributere u obliku diska. Podela distributera vazduha može se izvršiti i prema kriterijumu veličine mehurova na: distributere za sitne mehurove (1 - 4 mm) od keramike i plastike; srednje mehurove (5 - 10 mm) od perforiranih cevi i krupne mehurove (više od 10 mm) od vertikalnih cevi otvorenih sa donje strane. Veličina otvora (pora) kroz koje struji vazduh zavisi od poroznosti materijala. Otvori mogu biti izvedeni i mehaničkim putem perforiranjem materijala od koga se izrađuju distributeri vazduha.

Kod dubinske aeracije (aeracije pod pritiskom) i različitih tipova distributera vazduha važe određeni kriterijumi o načinu i mestu njihovog postavljanja u bazenima (reaktorima) u kojima se vrši aeracija. Distributeri se mogu postavljati po čitavoj površini dna aeracionog bazena, samo na jednoj njegovoj strani ili na određenoj visini od dna. U zavisnosti od izabranog tipa procesa prema kome je definisano prostorno opterećenje aeracionog bazena raspored distributera mora biti takav da se obezbede potrebna količina kiseonika.

Od dubine uronjenosti distributera i brzine strujanja vazduha zavisi koliko će biti vreme kontakta tečne i gasovite faze, odnosno ostvarena efikasnost prenosa kiseonika. Na efikasnost prenosa kiseonika utiče i čitav niz drugih faktora kao što su protok i karakteristike vode koja se prečišćava, geometrija aeracionog bazena, temperatura, veličina mehurova vazduha, itd.

Tabela 1 Tipovi distributera vazduha prema vrsti materijala za izradu

Naziv		Materijal	
Perforirana cev		Nerđajući čelik	
Keramički distributer		Keramika	na bazi silicijuma na bazi aluminijuma
Distributer od porozne plastike		Porozna plastika	kruta porozna plastika: polietilen visoke tvrdoće (HDPE); stiren-akrilonitril (SAN) savitljiva porozna plastika (polietilen + guma)
Membranski distributer	fleksibilni ili perforirani membranski distributeri vazduha	Termoplastični materijali	polivinil hlorid (PVC) sa dodacima
		Elastomeri	etilen propilen dimer (EPDM) sa aditivima

3 Pokazatelji rada sistema aeracije

Određivanje tehničkih karakteristika distributera vazduha vrši se ispitivanjima na laboratorijskim instalacijama kao i na realnim postrojenjima. Proizvođači distributera vazduha daju podatke o pojedinim tehničkih karakteristikama, zasnovanim na ispitivanjima u određenim uslovima. Pri ispitivanjima procesa aeracije postoji određeni broj promenljivih parametara i to: protok vazduha, karakteristike distributera vazduha, raspored distributera, dimenzije aeracionog bazena, itd. Ispitivanja se vrše radi dobijanja stvarnih vrednosti tehničkih karakteristika distributera na realnim postrojenjima ili se pak rezultati dobijeni u laboratoriji koriguju odgovarajućim koeficijentima. Ti koeficijenti su karakteristični za svaku vrstu otpadnih voda i nastali su brojnim istraživanjima na realnim postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda.

U katalogima proizvođača najčešće su prikazane standardne tehničke karakteristike distributera vazduha. One se dobijaju na osnovu standardnog zapreminskog koeficijenta transporta kiseonika $(k_L \cdot a)_s$, koji se određuje eksperimentalno na laboratorijskim instalacijama. Na osnovu tih podataka projektant postrojenja za obradu otpadnih voda usvaja određen tip distributera vazduha, pri čemu se vodi računa da stvarni kapacitet unošenja kiseonika bude veći ili jednak stvarnoj potrebi za kiseonikom u određenom delu procesa obrade otpadnih voda.

Osnovne tehničke karakteristike koje definišu efikasnost rada aeratora sa uduvavanjem vazduha (distributera vazduha) su:

- standardni kapacitet unošenja kiseonika OC kg/h,
- stvarni kapacitet unošenja kiseonika OC' kg/h,
- specifični kapacitet unošenja kiseonika OC_h g/(m³·m),
- standardna efikasnost transporta kiseonika E %,
- stvarna efikasnost transporta kiseonika E' %,
- standardna energetska efikasnost transporta kiseonika E_e kg/kWh,
- stvarna energetska efikasnost transporta kiseonika E_e' kg/kWh,
- pad pritiska po jednom distributeru vazduha Δp_d Pa.

Pri tome su standardni kapacitet unošenja kiseonika, standardna efikasnost transporta kiseonika i standardna energetska efikasnost transporta kiseonika definisani isključivo za čistu vodu pri standardnim uslovima ispitivanja. Standardni uslovi ispitivanja su:

- ispitivana tečnost-čista voda,
- početna vrednost zapreminske masene koncentracije rastvorenog kiseonika u vodi, $c_o = 0$ mg/l,
- temperatura vode, $t_L = 20$ °C.

Kapacitet unošenja kiseonika se definiše preko standardnog kapaciteta unošenja kiseonika (OC) i stvarnog kapaciteta unošenja kiseonika (OC'). Standardni kapacitet unošenja kiseonika je definisan za čistu vodu pri standardnim uslovima, a stvarni za otpadnu vodu pri radnim uslovima.

Standardni kapacitet unošenja kiseonika (OC)

Standardni kapacitet unošenja kiseonika definisan je izrazom 1 [2]:

$$OC = (k_L a)_s \cdot c_s^* \cdot V_L, \text{kg/h}, \quad (1)$$

gde su:

$(k_L a)_s$,1/h, - standardni zapreminski koeficijent transporta kiseonika (korigovan na temperaturu od 20 °C),

c_s^* ,kg/m³, - ravnotežna zapreminska masena koncentracija kiseonika u čistoj vodi pri standardnim uslovima ($p_n=101,3$ kPa, $t_L=20$ °C), $c_s^* = 9,17 \cdot 10^{-3}$ kg/m³,

V_L ,m³, - zapremina vode.

Stvarni kapacitet unošenja kiseonika (OC')

Stvarni kapacitet unošenja kiseonika se dobija množenjem standardnog kapaciteta unošenja kiseonika odgovarajućim korekcionim faktorima, kojima se standardni uslovi ispitivanja svode na radne uslove (izraz 2).

$$OC' = \alpha \cdot OC \cdot \frac{\beta \cdot c_h^* - c_o}{c_s^*} \cdot \theta^{(t_L-20)}, \text{kg/h}, \quad (2)$$

gde su:

α , - , - relativni stepen prenosa kiseonika u otpadnoj vodi, $\alpha = 0,8 \div 0,94$,

β , - , - relativni stepen zasićenja otpadne vode kiseonikom, $\beta = 0,90 \div 0,97$,

θ , - , - temperaturski korekcionni faktor,

c_h^* ,mg/l, - ravnotežna zapreminska masena koncentracija rasvorenog kiseonika u čistoj vodi pri stvarnim uslovima, korigovana u odnosu na visinu stuba tečnosti iznad distributera vazduha i molski udeo kiseonika u vazduhu,

c_o ,mg/l, - početna zapreminska masena koncentracija rasvorenog kiseonika u vodi,

t_L ,°C, - temperatura vode.

Koeficijenti α i β se određuju ispitivanjem na realnim postrojenjima za svaku vrstu otpadne vode i tehnološki proces prečišćavanja.

Relativni stepen prenosa kiseonika (α) tzv. α -faktor predstavlja odnos zapreminskog koeficijenta transporta kiseonika u otpadnoj vodi i standardnog zapreminskog koeficijenta transporta kiseonika u čistoj vodi. Relativni stepen prenosa kiseonika (α) zavisi od svih tehničko-tehnoloških parametara rada realnog postrojenja za biološku obradu otpadnih voda i kao takvog ga je veoma teško odrediti. Najčešće se na osnovu velikog broja eksperimentalnih ispitivanja na postrojenjima sličnog tipa i kapaciteta dobijaju intervali vrednosti α -faktora. U praksi, pri projektovanju sistema za prečišćavanje, projektanti koriste srednje vrednosti iz datih intervala. Vrednost α -faktora kod bioaeracionih bazena sa potpunim mešanjem se kreće u intervalu od 0,8 do 0,94 [3].

Kod bioaeracionih bazena sa nepotpunim mešanjem, plitkih bazena sa nedovoljnim unošenjem kiseonika ili pak sa visokim sadržajem površinski aktivnih supstancija u otpadnoj vodi vrednosti α -faktora mogu da budu veoma niske, što utiče na efikasnost procesa prečišćavanja. Relativni stepen zasićenja otpadne vode kiseonikom β je blizak jedinici i kreće se u intervalu od 0,90 do 0,97 [3].

Što je efikasnije prečišćavanje otpadnih voda to su vrednosti α i β bliži jedinici, tj. vrednostima pri standardnim uslovima ispitivanja.

Ravnotežna zapreminska masena koncentracija rastvorenog kiseonika u čistoj vodi pri stvarnim uslovima, korigovana u odnosu na visinu stuba tečnosti iznad distributera vazduha se izračunava na sledeći način (izraz 3) [4]:

$$c_h^* = c_s^* \cdot \left[1 + \frac{\rho_L \cdot g}{p_n} \cdot (H - h) \right], \text{mg/l}, \quad (3)$$

gde su:

ρ_L ,kg/m³, - gustina vode,

H ,m, - ukupna visina vodenog stuba,

h ,m, - visina vodenog stuba od dna bazena do distributera.

Stvarni kapacitet unošenja kiseonika (OC')

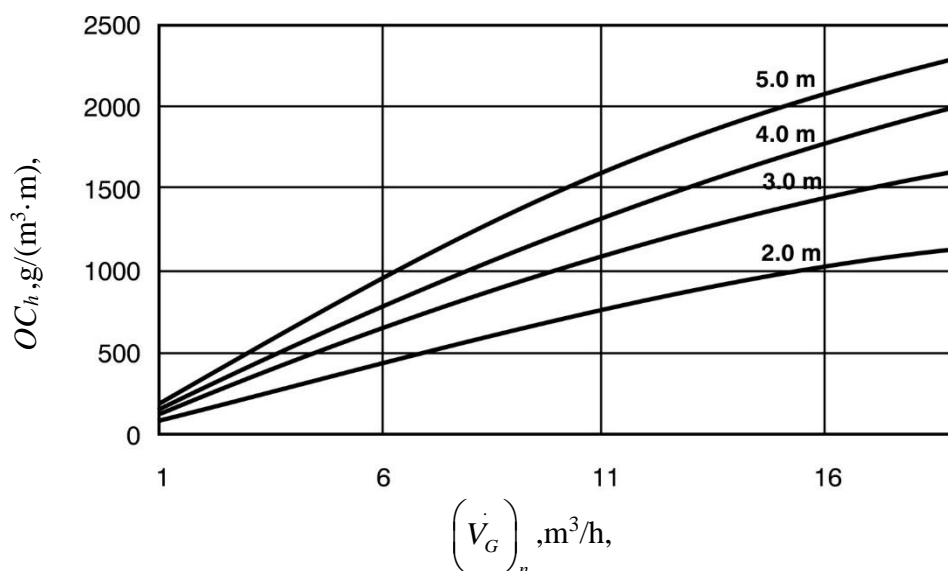
Specifični kapacitet unošenja kiseonika određuje se prema izrazu 4 [3]:

$$OC_h = \frac{1000 \cdot OC}{\left(\dot{V}_G \right)_n \cdot H}, \frac{\text{g}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}, \quad (4)$$

gde je:

$\left(\dot{V}_G \right)_n$,m³/h, - zapreminski protok vazduha pri standardnim uslovima ($p_n=101,3$ kPa, $t_L=20$ °C).

Na slici 2 je prikazana tipična zavisnost specifičnog kapaciteta unošenja kiseonika od protoka vazduha, za različite visine vodenog stuba.



Slika 2 Specifični kapacitet unošenja kiseonika u funkciji protoka vazduha [5]

Standardna efikasnost transporta kiseonika (E)

Standardna efikasnost transporta kiseonika se izražava u procentima i definisana je odnosom standardnog kapaciteta unošenja kiseonika i ukupnog protoka kiseonika koji se dovodi uređajem za aeraciju, odnosno [6]:

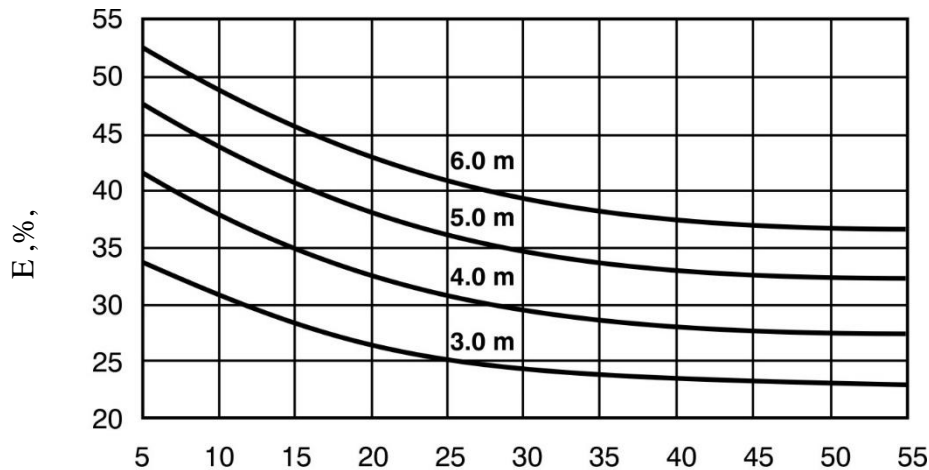
$$E = \frac{OC}{\dot{G}_{O_2}} = \frac{OC}{\left(\dot{V}_G\right)_n \cdot \rho_G \cdot y_{O_2}} \cdot 100 \text{ , \%}, \quad (5)$$

gde su:

\dot{G}_{O_2} ,kg/h, - maseni protok kiseonika koji ulazi u vodu sistemom aeracije,

ρ_G ,kg/m³, - gustina vazduha pri standardnim uslovima ($t_G = 20 \text{ }^\circ\text{C}$),

y_{O_2} ,kg/kg, - maseni udeo kiseonika u vazduhu, $y_{O_2} = 0,232 \text{ kg/kg}$.



$$\left(\dot{V}_G\right)_n, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}),$$

Slika 3 Standardna efikasnost transporta kiseonika u funkciji specifičnog protoka vazduha [5, 7]

Stvarna efikasnost transporta kiseonika se kao i standardna efikasnost transporta kiseonika izražava u procentima i predstavlja odnos stvarnog kapaciteta unpušenja kiseonika i ukupnog protoka kiseonika koji se dovodi uređajem za aeraciju:

Stvarna efikasnost transporta kiseonika (E')

Standardna efikasnost transporta kiseonika se izražava u procentima i definisana je odnosom standardnog kapaciteta unošenja kiseonika i ukupnog protoka kiseonika koji se dovodi uređajem za aeraciju, odnosno [6]:

$$E' = \frac{OC'}{\dot{G}_{O_2}} = \frac{OC'}{\left(\dot{V}_G\right)_n \cdot \rho_G \cdot y_{O_2}} \cdot 100 \text{ , \%}, \quad (6)$$

Standardna energetska efikasnost transporta kiseonika (E_e)

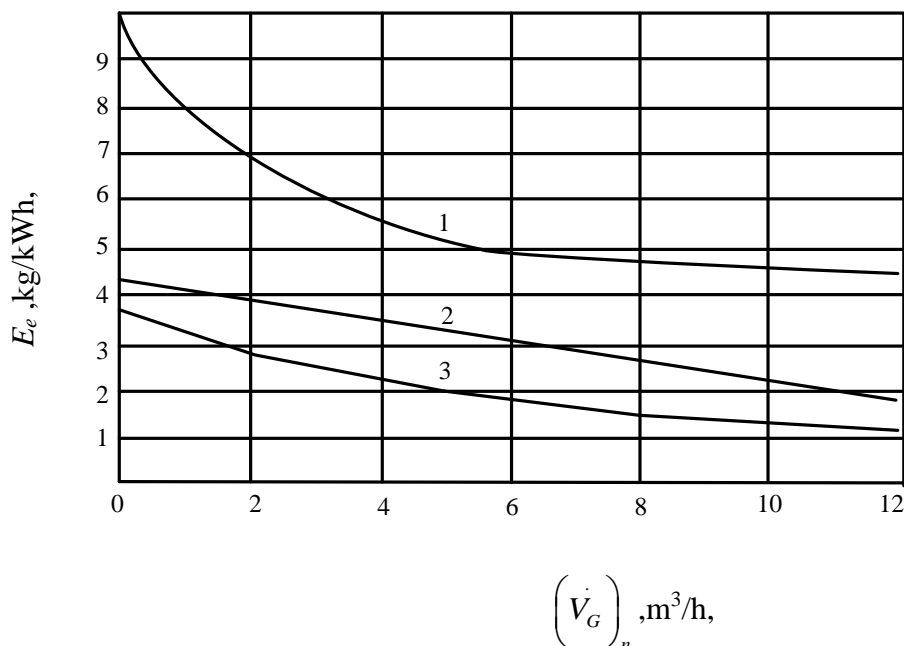
Standardna energetska efikasnost transporta kiseonika predstavlja odnos standardnog kapaciteta unošenja kiseonika i angažovane snage potrebne za pogon uređaja za aeraciju, odnosno:

$$E_e = \frac{OC}{\sum_i P_i}, \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \quad (7)$$

gde je:

$\sum_i P_i$,kW, - zbir angažovane snage svih elektromotora (za pogon aeratora, duvaljke itd.).

Na slici 4 prikazana je zavisnost standardne energetske efikasnosti transporta kiseonika od zapreminskog protoka vazduha za tri različita tipa distributera vazduha.



Slika 4 Standardna energetska efikasnost transporta kiseonika u funkciji protoka vazduha za tri različita tipa distributera: 1- panelni distributer, 2-keramički distributer u obliku kupole, 3-cevni membranski distributer [7]

Stvarna energetska efikasnost transporta kiseonika (E_e')

Pored standardne definiše se i stvarna energetska efikasnost transporta kiseonika koja predstavlja odnos stvarnog kapaciteta unošenja kiseonika i angažovane snage potrebne za pogon uređaja za aeraciju, odnosno:

$$E_e' = \frac{OC'}{\sum_i P_i}, \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}, \quad (8)$$

Pad pritiska kroz distributer vazduha

Za proces aeraciju bitan pokazatelj je i pad pritiska (Δp_d) koji se ostvaruje na jednom distributeru vazduha. Proizvođači distributera ovaj parametar najčešće daju u obliku dijagrama, pri čemu se pad pritiska povećava sa povećanjem protoka ulazne struje vazduha.

Na slici 5 je prikazana tipična zavisnost pada pritiska po jednom membranskom distributeru vazduha u zavisnosti od protoka vazduha.

Ukupni pad pritiska u sistemu aeracije

Ukupni pad pritiska u sistemu aeracije predstavlja zbir padova pritisaka (usled trenja u cevovodima, usled lokalnih otpora, kroz distributer vazduha, usled geodeuzijske visine).

Ukupni pad pritiska u sistemu aeracije je:

$$\Delta p = \sum_i \Delta p_t + \sum_i \Delta p_\xi + \Delta p_d + \rho_L \cdot g \cdot H, \text{ Pa}, \quad (9)$$

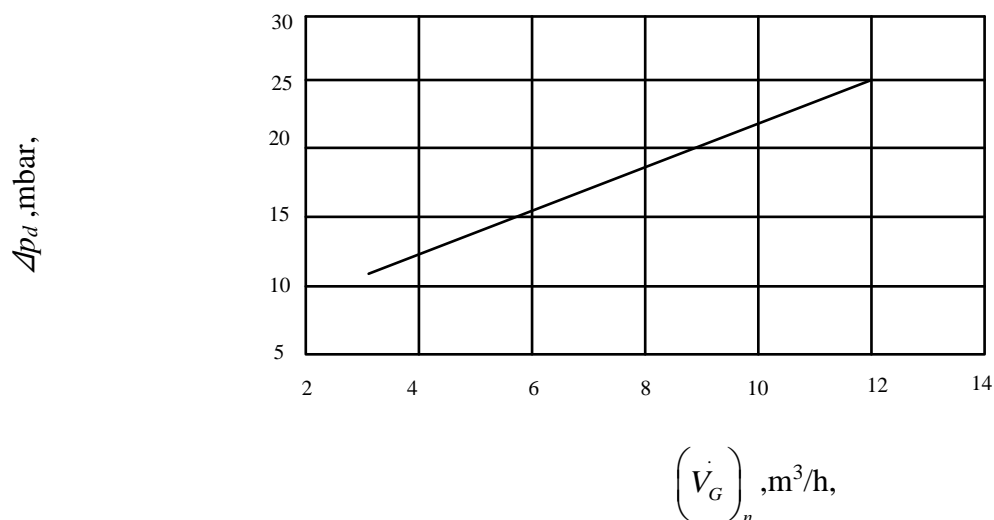
gde su:

$\sum_i \Delta p_t$,Pa, - pad pritiska usled trenja u cevovodu,

$\sum_i \Delta p_\xi$,Pa, - pad pritiska usled lokalnih otpora,

Δp_d ,Pa, - pad pritiska kroz distributer vazduha,

$\rho_L \cdot g \cdot H$,Pa, - pad pritiska usled geodezijske visine.



Slika 5 Dijagram zavisnosti pada pritiska kroz distributer vazduha od protoka vazduha [8]

Na osnovu definisane potrebne količine vazduha i proračunatog pada pritiska vrši se izbor sistema za dovod vazduha (kompresorskog postrojenja).

Broj distributera u sistemu aeracije

Za izbor tipa distributera potrebni su podaci o tehničkim karakteristikama (dimenzije, kapacitet m³/h, materijal izrade, masa i dr.).

Na osnovu određenog zapreminskog protoka vazduha (u m³/h) u toku perioda aeracije i odabranog tipa distributera određuje se potreban broj distributera prema izrazu 10:

$$n_d = \frac{(\dot{V}_G)_n}{\dot{V}_d}, \quad (10)$$

gde je:

\dot{V}_d , m³/h, - protok vazduha kroz jedan distributer.

4 Zaključak

U radu su prikazane neke osnovne radne karakteristike uređaja za aeraciju (distributera vazduha) koji se koriste u procesima aerobne biološke obrade komunalnih i različitih vrsta industrijskih otpadnih voda. Zavisnosti koje su date za određene pokazatelje predstavljaju primere iz kataloga proizvođača opreme za aeraciju.

Od veličina koji definišu efikasnost rada distributera vazduha (za sisteme dubinske aeracije) analizirani su: kapacitet unošenja kiseonika, efikasnost prenosa kiseonika, energetska efikasnost i specifična potrošnja energije.

Pri izboru sistema za aeraciju (vrste distributera) osnovni kriterijum je da kapacitet unošenja kiseonika u otpadnu vodu odgovara potrošnji kiseonika, koja se definiše na osnovu odabranog tipa procesa i organskog opterećenja otpadne vode.

5 Reference

- [1] **Stanojević, M., Simić, S., Radić, D., Jovović, A.:** *Aeracija otpadnih voda, Teorija i proračuni*, ETA, Beograd, 2006.
- [2] *** Fine Pore Aeration Systems, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, 1989.
- [3] **White, J.:** *Wastewater Engineering*, Edward Arnold Ltd, Hill Street, London, 1978.
- [4] **Fujie, K.:** *Air Diffuser Performance in Activated Sludge Aeration Tanks*, Journal Water Pollution Control Federation, Washington, 1985.
- [5] *** MESSNER, Plattenbelufter, Katalog proizvodnog programa.
- [6] **Wagner, M., J. Pöpel:** *Oxygen transfer and aeration Efficiency-Influence of Diffuser submergence, Diffuser Desity and Blower Type*, Water Quality International IAWQ 19th Biennial International Conference, Vancouver, Canada, 1998.
- [7] *** HAFIENGINEERING, Environmental Technology, Waste Water, Aeration Panels, Nemačka, 1996.
- [8] *** Environmental engineering, Gerard Kiely, Mc Graw – Hill, 1996.