

Az eleveniszap oxigénfogyasztásának mérése laboratóriumi léptékű folytonos biológiai tisztítóberendezésen

I. Elméleti összefoglaló

A biológiai oxigénfogyasztás, idegen szóval respiráció egy ATP termelésére szolgáló metabolikus folyamat, melynek során a mikroorganizmusok szerves vagy szervetlen vegyületeket hasznosítanak **elektrondonorként**, vagyis szubsztrátként; illetve szervetlen anyagokat – mint az O_2 , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} – használnak végső **elektronakceptor**ként. Amennyiben az elektronakceptor oxigén, a folyamatot **aerob respiráció**nak nevezzük. Ahogy a szubsztrátból felszabaduló elektronok az elektrontranszport lánc elemein keresztül eljutnak az oxigénig, ATP termelődik. Az energia a különböző molekuláris alkotóelemek előállítására fordítódik, melyek szükségesek a sejtek növekedéséhez és szaporodásához.

A szennyvízben lévő **heterotróf** organizmusok, mint például a baktériumok, protozoák, és magasabb rendű szervezetek széntartalmú szerves vegyületeket használnak fel szubsztrátként a légzésük során. Tipikusan a szubsztrát tömegének fele alakul át biomasszává, a többi részét eloxidálják energiatermelés céljából. A másik alapvető oxigénfogyasztó mikrobaközösséget a **nitrifikálók** alkotják, melyek az ammónia – mint szubsztrát – csak egy részét használják fel új sejtanyag termelésére, nagy része energiatermelésre fordítódik. Ezen autotróf élőlények oldott széndioxidot is használnak új sejttömeg előállítására, szervetlen szénforrásként. A heterotrófokhoz képest növekedésük több oxigént igényel.

A legtöbb respirometriás mérés, amely a folyadékfázisban oldott oxigén (DO) koncentráció mérésén alapul, egy elektrokémiai **DO szonda** alkalmazását igényli. Ezek a műszerek többnyire két vagy három elektródot tartalmaznak egy elektrolit oldatban, amelyet egy félig áteresztő membrán választ el a folyadéktól. Az oxigénmolekulák a folyadékból a membránon keresztül átdiffundálnak a belső oldatba. A katódon redukálódnak, elektromos áramot generálva; mely arányos a membránon átjutó molekulák diffúziós sebességével, amely pedig arányos az oldatbeli DO koncentrációval.

A bioreaktorok oxigénmérlegét alapvetően két folyamat határozza meg, az **oxigénátadás**, vagyis az oxigén levegőztetéssel történő bevitele; illetve az **oxigénfogyasztás**, tehát a mikroorganizmusok aerob metabolizmusa során fellépő oxigén-felhasználás. **Szakaszos** körülményekre ezek alapján felírhatunk három egyszerűbb alapesetet, ahol nem

kell számolnunk az egységbe érkező, illetve onnan távozó folyadékáramokkal, melyek befolyásolnák a jelenlevő oxigén koncentrációt:

Amennyiben egy **tiszta vízzel** megtöltött reaktort levegőztetünk, amelyben nincsenek mikrobák; az oxigén csak beoldódni fog a vízbe, így az alábbi összefüggést írhatjuk fel rá:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_s - C) \quad (1)$$

ahol C : a folyadékfázisban oldott oxigén koncentrációja egy adott időpontban [mg/l]

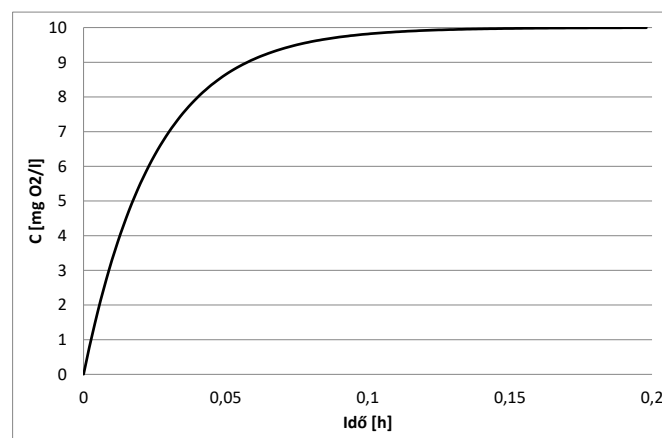
C_s : a telítési oldott oxigén koncentráció [mg/l]

K_L : az oxigén folyadékoldali tömegátadási tényezője [1/h]

a : fajlagos anyagátadási felület [m^2/m^3]

$K_L a$: folyadékoldali oxigénabszorpciók együttható [1/h]

Az oxigén abszorpciójának hajtóereje $C_s - C$. Minél közelebb van az oxigénszint a telítési értékhez, annál kisebb a hajtóerő, értelemszerűen. Az oldott oxigén koncentrációja telítési görbe szerint éri el a maximális értékét.



1. ábra: Oxigénszint telítődési görbe ($C_s = 10$ mg/l, $K_L a = 40$ 1/h)

Ha a reaktor tartalmaz aerob metabolizmusú aktív mikroflórát, viszont **nincs levegőztetve**; akkor a mikroorganizmusok elfogyasztják a rendelkezésükre álló oldott oxigént, így annak koncentrációja lecsökken. Ezt az esetet az alábbi módon írhatjuk le:

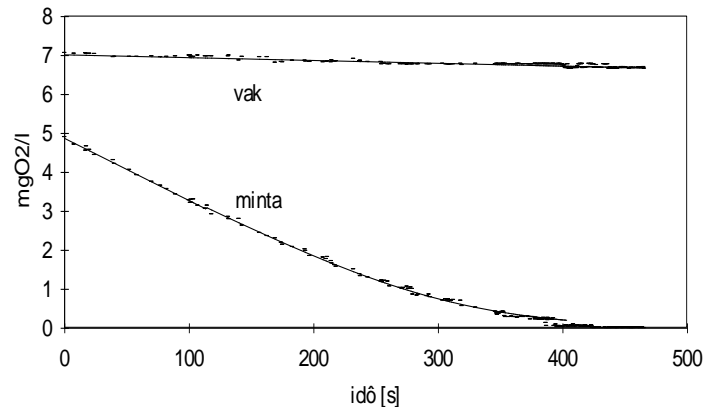
$$\frac{dC}{dt} = -r = -(r_e + r_s) \quad (2)$$

ahol r : teljes légzési sebesség [mg/(l·h)]

r_e : endogén légzési sebesség [mg/(l·h)]

r_s : szubsztrát légzési sebesség [mg/(l·h)]

Ha elfogy a mikrobák rendelkezésére álló szubsztrát; a teljes légzési sebesség, vagy oxigénfelvételi sebesség (OUR: oxygen uptake rate) az **endogén** légzési sebességgel egyezik meg, hiszen ekkor a mikrobák csak saját fenntartásukra hasznosítják az oxigént, tartaléktápanyagaikat használva energiaforrásként. Az endogén légzési sebesség állandó, így a csökkenés jellege lineáris; viszont C_{krit} kritikus oldott oxigén koncentráció elérése után az oxigén limitál, így egyre kisebb mértékben csökken, míg el nem éri a zérust. A fajlagos légzési sebesség (SOUR) egységnyi biomassza koncentrációra vonatkoztatja az OUR értékét.



2. ábra: Eleveniszap légzési sebesség görbe
szubsztrát nélküli endogén légzés (vak) és szubsztráttal (minta) $C_{krit} \approx 1$ mg/l

Amennyiben a reaktorban a lélegző tenyészet oxigénfogyasztását pótoljuk **levegőztetéssel** is, a vízben oldott oxigén koncentrációja az alábbi mérlegegyenlet szerint változik az időben, lényegében a korábbiakban tárgyalt hatások eredőjeként:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_s - C) - r$$

(3)

Ha már endogén állapotban lévő mikrobákról beszélünk, az oldott oxigénszint beáll egy kvázi konstans értékre; ám hosszú időtartamra nézve valójában növekszik, ahogy a mikrobák légzési aktivitása csökken, pusztulásuk következtében. Az említett értéket szokták egyensúlyi koncentrációnak (C_a) is nevezni.

Folyamatos körülmények esetén a betáplálás, illetve elvétel is meghatározza a folyadékfázis oxigénmértékét. A két folyadékáram mennyisége megegyezik, így biztosítható a reaktor állandó hasznos térfogata. Ez az eset a következő mérlegegyenlettel írható le, a tagokat mg/h dimenzióban kifejezve:

$$\frac{d(V_r \cdot C)}{dt} = Q_{be} \cdot C_{be} - Q_{el} \cdot C + V_r K_L a \cdot (C_s - C) - V_r r \quad (4)$$

ahol V_r : a hasznos reaktortérfogat [l]

Q_{be} : befolyó térfogatáram [l/h]

Q_{el} : elfolyó térfogatáram [l/h]

C_{be} : a bejövő folyadékban oldott oxigén koncentrációja [mg/l]

Levegőztetési műveleteknél egyrészt a $K_L a$ értékét érdemes növelni az átadási folyamat hatékonyságának javítása céljából. Ezen kívül fontos tényező C_s , hiszen meghatározza az átadás hajtóerejét; ám szennyvíztisztítási biotechnológiáknál ennek növelése csak korlátozottan lehetséges (a medence mélységgel növekvő egyensúlyi koncentrációval). Az oxigén rosszul, kis mértékben képes csak a vízbe beoldódni, **telítési koncentrációja** az adott környezeti paraméterektől függ. Atmoszférikus nyomáson (760 Hgmm), az alábbi táblázat szerint változik különböző **hőmérsékleteken**:

Hőmérséklet (°C)	C _s (mg/l)
0	14.6
1	14.2
2	13.81
3	13.45
4	13.09
5	12.76
6	12.44
7	12.13
8	11.83
9	11.55
10	11.28

Hőmérséklet (°C)	C _s (mg/l)
11	11.02
12	10.77
13	10.53
14	10.29
15	10.07
16	9.86
17	9.65
18	9.45
19	9.26
20	9.08
21	8.9

Hőmérséklet (°C)	C _s (mg/l)
22	8.73
23	8.56
24	8.4
25	8.24
26	8.09
27	7.95
28	7.81
29	7.67
30	7.54

1. táblázat: A telítési oldott oxigén koncentráció függése a víz hőfokától

Továbbá, a maximális koncentráció értéke függ a víz **összetételétől** is, többek között a benne lévő különböző elektrolitok, illetve szerves anyagok mennyiségétől; minél többet tartalmaz a víz, annál kevesebb oxigént képes befogadni. A kezelendő szennyvíz összetétele és hőmérséklete adott, változtatásukkal nem növelhetjük a telítési koncentrációt; továbbá jegyezzük meg azt is, hogy bár alacsonyabb hőmérsékleteken több oxigén képes oldódni, a metabolikus folyamatoknak kedvezőtlen.

K_La tagjai közül az anyagátadási felület megnövelhető a **hold up**, vagyis a gáztérfogat/teljes hasznos térfogat arányának emelésével. Minél nagyobb a **levegőztetési térfogatáram**, vagy pedig minél kisebb a **buborékok átmérője**; annál nagyobb gáz hold up-ot érhetünk el. A buborékméret a levegőztető elem lyukátmérőivel csökkenthető. Utóbbi feladat megoldható a mechanikus keverés intenzitásának növelésével is; ám szennyvíztisztítás során keverőelemeket többnyire csak a nem aerob műveleteknél alkalmaznak, mivel az aerob reaktorban a levegőztetés biztosítja a megfelelő elkeveredést is. Felületaktív anyagok, a felületi feszültség csökkentésével együtt stabilizálják, ezzel megnövelik a levegő-víz határfelületet, azaz a-t. Ugyanakkor ezek az anyagok megnövelik a buborékok folyadékoldali ellenállását és a stagnáló folyadékfilm vastagságát, lecsökkentve ez által a K_L paramétert. Így tehát a két hatás eredőjétől függ, hogy egy adott felületaktívan viselkedő anyag, (pl. zsírsav, fehérje) milyen hatást gyakorol a K_La-ra. K_La értéke növelhető a hőmérséklettel is, ám ez egyrészt nem egy gazdaságos megoldás, másrészt pedig ezzel C_s értékét csökkentenénk. Az oldott anyagok koncentrációjával nem csak C_s, de K_La értéke is lecsökken; ám a szennyvíznek ezt a tulajdonsága adott, nem befolyásolhatjuk.

Az oxigénátadási mérőszámok közül a legáltalánosabb K_La, mely az oxigénabszorpció hatékonyságát tükrözi egy adott levegőztetési beállítás esetén. **Mérése szennyvízben** úgy

lehetséges, ha biztosítjuk, hogy a mikrobák csak endogén, állandó légzési sebességgel fogyasztják az oxigént. Egy konstans levegőáram mellett beáll a kvázi állandósult állapot (steady state), az oldott oxigén egyensúlyi koncentrációban (C_a) van jelen a vízben. Erre az esetre felírható a következő összefüggés:

$$r = K_L a \cdot (C_s - C_a) \quad (5)$$

Az r -nek ezt a kifejezését behelyettesítve a szakaszos reaktorban történő oxigénátadást jellemző egyenletbe, leírhatjuk az oldott oxigén koncentráció változását állandó mikrobiális légzés mellett:

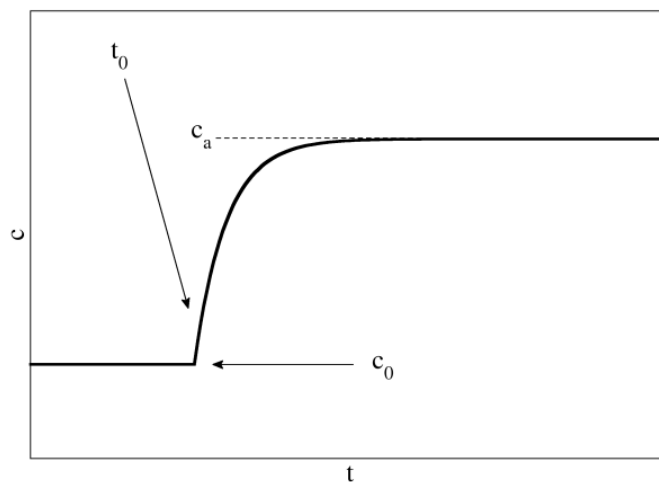
$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_s - C) - K_L a \cdot (C_s - C_a) \quad (6)$$

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_a - C) \quad (7)$$

A differenciálegyenletet a $t=t_0$ és $C(t_0)=C_0$ kezdeti feltételekkel megoldva $K_L a$ a következő alakban fejezhető ki:

$$K_L a = \frac{\ln\left(\frac{C_a - C_0}{C_a - C}\right)}{t - t_0} \quad (8)$$

Az alábbi ábra szemlélteti, hogy egy alacsonyabb DO koncentrációról egy magasabbra történő emelkedés során a telítési görbe mely paramétereit vizsgáljuk $K_L a$ mérésénél:



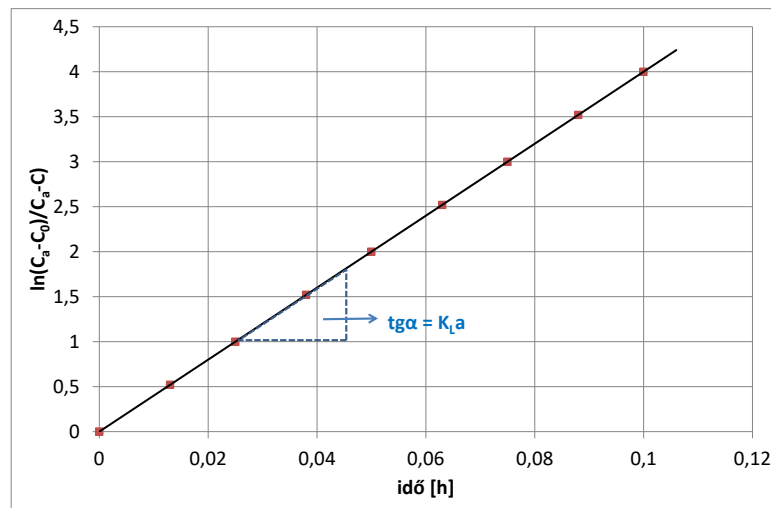
3. ábra: Az anyagátadási egyenlet paramétereinek grafikus megjelenítése

A levezetett kifejezéséből természetesen minden t időponthoz, és a hozzájuk tartozó C koncentrációkhoz kiszámíthatnánk egy K_{La} értéket, de a mérés zaja miatt ezek nagy szórást mutatnának, ezért így nem szokás az értékelést elvégezni. Ehelyett a görbe linearizációjával jobb megoldáshoz jutunk; ha az $\ln\left(\frac{C_a - C_0}{C_a - C}\right)$ értékeket ábrázoljuk az idő (t) függvényében, egy olyan egyenest kapunk, melynek meredeksége maga K_{La} (tengelymetszete pedig $-K_{La} \cdot t_0$):

$$\ln\left(\frac{C_a - C_0}{C_a - C}\right) = K_{La} \cdot t - K_{La} \cdot t_0$$

(9)

Lineáris regresszióval a keresett egyenes meredeksége, azaz K_{La} leolvasható.



4. ábra: Az anyagátadási tényező meghatározása

Egy adott vízhőfokon meghatározott értéket (K_{LaT}) az alábbi **hőmérsékletkorrekcióval** lehet átszámítani a 20 °C-os standard hőmérsékleti értékre (K_{La20}):

$$K_{La20} = K_{LaT} \cdot 1,024^{(20-T)}$$

(10)

Az eddig ismert paraméterekből kiszámítható az **SOTR** (Standard Oxygen Transfer Rate), amely kifejezi az óránként maximálisan átadható oxigénmennyiséget a standard körülményekre. Általában kg/h dimenzióban adják meg.

$$SOTR = K_{La20} \cdot C_{s,20} \cdot V_T$$

(11)

Mivel figyelembe vesszük a standard körülmények eltérését a kísérletiekhez képest, ezért a tapasztalt telítési koncentrációt ($C_{s,T}$) is korrigálnunk kell egy standardizált értékre ($C_{s,20}$), a következő összefüggés segítségével:

$$C_{s,20} = C_{s,T} \left(\frac{1}{\frac{C_{s,T}'}{C_{s,20}'} \cdot \frac{p_b}{p_{std}}} \right) \quad (12)$$

ahol $C_{s,T}'$: telítési DO koncentráció táblázatos értéke, a mérés hőmérsékletén [mg/l]

$C_{s,20}'$: telítési DO koncentráció táblázatos értéke 20 °C-on és 1 atm nyomáson [mg/l]

p_b : a kísérlet során mérhető barometrikus nyomás [atm]

p_{std} : standard körülményekre vonatkoztatott nyomás [atm]

Az **SOTE** érték [-] pedig egy levegőáramban jelenlévő oxigén beoldódott hányadát fejezi ki a standardnak értelmezett körülmények között.

$$SOTE = SOTR/W_{O_2}$$

W_{O_2} a levegőztetéssel bejuttatott oxigén tömegárama [kg/h], mely az alábbi képlettel határozható meg:

$$W_{O_2} = x_{O_2} \cdot W_L = x_{O_2} \cdot Q_L \cdot \frac{p_L \cdot M_L}{R \cdot T_{20}} \quad (13)$$

ahol x_{O_2} : a levegőben lévő oxigén **tömegtörtje: ~0,2346**

W_L : a levegőztetés tömegárama [kg/h]

Q_L : a levegőztetés térfogatárama [m³/h]

p_L : a száraz levegő parciális nyomása: 101325 Pa

M_L : a száraz levegő moláris tömege: 0,028964 kg/mol

R : egyetemes gázállandó: 8,314 J/(mol·K)

A **respirometria** felhasználható különböző mintákban lévő szubsztrátok lebontásához szükséges oxigén mennyiségének mérésére. Így szerves széntartalmú szubsztrát adagolása esetén, a heterotróf mikroflóra oxigénfogyasztását kihasználva meghatározható a szubsztrát rövid idejű biológiai oxigénigénye (**rBOI**). Am NH_4-N tartalmú minta vizsgálatánál is hasonló elven megkapható a **nitrifikáció oxigénigénye**. Ha mind a két fajta szubsztrátot tartalmazza a mintánk, az rBOI paramétert külön is megvizsgálhatjuk a nitrifikáló organizmusok metabolizmusát gátló inhibitor vegyület (ATU) adagolásával.

A mérések elve egyszerű: a vizsgálandó anyagból egy adott kis mennyiséget juttatunk nagy mennyiségű, endogén állapotban lévő aerob mikrobakultúrához. Az adagolt szubsztrát hatására a mikrobák légzési sebessége megnő, így az oxigénkoncentráció lecsökken. Ahogy fogy a tápanyag, a szubsztrát légzés sebessége fokozatosan lecsökken zérusra, és végül egy telítési görbe mentén visszaáll az adagolás előtti C_a egyensúlyi DO koncentráció.

Az adott szubsztrát elfogyasztása során felhasznált oxigénigény [mg] kifejezése a mérésből legegyszerűbben úgy történhetne, ha a szubsztrát légzési sebességet integrálnánk a mérés kezdeti (0) és végső (t_v) időpontja között:

$$rBOI = V_r \int_0^{t_v} r_s(t) dt \quad (14)$$

Azonban a légzési sebesség nem mérhető közvetlenül egy DO szonda segítségével, ezért más módszert használunk a kiértékeléshez, az oxigénátadási egyenletből kiindulva. Az állandó mikrobiális légzésre vonatkozó egyenlet az alábbi módon bővül, ha szubsztrát légzést is tapasztalunk a rendszerben:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a \cdot (C_a - C) - r_s \quad (15)$$

Ezt integrálva az alábbi kifejezéshez jutunk:

$$\int_0^{t_v} dC = \int_0^{t_v} K_L a (C_a - C(t)) dt - \int_0^{t_v} r_s(t) dt \quad (16)$$

Ezen rövid időintervallum alatt $K_L a$ -t konstansnak feltételezhetjük, ebből kifolyóan:

$$C(0) - C(t_v) = K_L a \int_0^{t_v} (C_a - C(t)) dt - \int_0^{t_v} r_s(t) dt \quad (17)$$

Mivel az oldott oxigén koncentráció a mérés kezdetén ($C(0)$) és a mérés végén ($C(t_v)$) lényegében megegyezik, különbségük 0; az egyenlet jobb oldalán lévő két tag egyenlővé tehető. Így eljutunk a korábbi egyenletben szereplő $rBOI$ kifejezéséhez:

$$\int_0^{t_v} r_s(t) dt = K_L a \int_0^{t_v} (C_a - C(t)) dt = \frac{rBOI}{V_r}$$

(18)

Tehát, ha meghatározzuk a mérés során kapott csúcs feletti területet (T) az egyensúlyi alapvonalig, akkor ezt csupán meg kell szoroznunk K_{La} -val és a reaktortérfogattal, hogy megkapjuk rBOI **mg**-ban kifejezhető értékét (azaz a kísérlet során beadagolt szubsztrát oxidációjához szükséges oxigén mennyiségét).

$$rBOI = K_{La} \int_0^{t_v} (C_a - C(t)) dt \cdot V_r = K_{La} \cdot T \cdot V_r$$

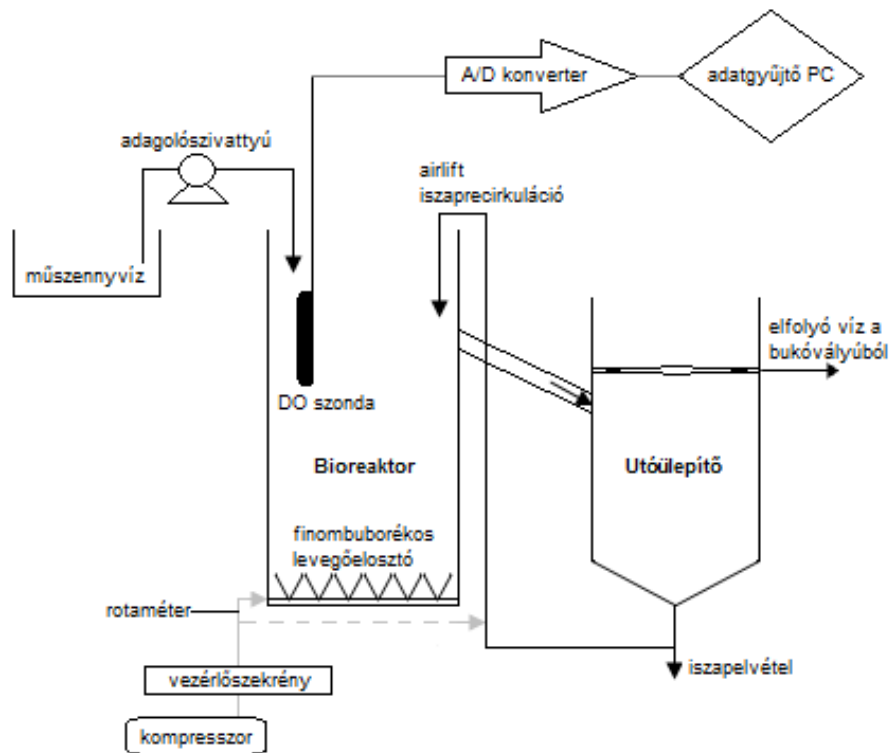
(19)

Természetesen ezzel a mérési módszerrel egységnyi NH_4-N impulzus adagolása esetén is megmérhetjük a lebontás oxigénigényét, mely az adagolt mennyiséggel elosztva megadja a **nitrifikáció fajlagos oxigénigényét** (ennek az elfogyasztott ammóniára számolt elméleti értéke 4,2 gO/gN)

II. A mérés leírása

A **mérés célja**, hogy egy eleveniszapos bioreaktorban tartózkodó mikrobaközösség segítségével ellenőrizzük adott mennyiségű adagolt szerves szubsztrát, illetve NH_4-N mennyiség eltávolításához szükséges oxigén mennyiségét DO szondával. Ezen kívül számszerűsítjük a reaktor oxigénátadási tulajdonságait az erre használatos mérőszámokkal.

A kísérleti rendszer fő eleme egy egyfokozatú folytonos eleveniszapos tisztítóberendezés, melyet az alábbi **készülékrajz** ismertet:



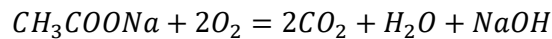
5. ábra: A kísérleti mérőberendezés vázlatos sémája

A bioreaktor egy 5,5 l hasznos térfogatú levegőztető medence, melybe a kompresszor által szolgáltatott levegőt **finombuborékos** membrán levegőztető elemen keresztül juttatjuk be. A levegőáram szabályozható, térfogatáramát rotaméterrel mérjük. Ha a mérés során le kell állítani a levegőztetést, a megfelelő keverés biztosítható egy búvármotoros **keverőszivattyú** elhelyezésével is. (A pontos oxigénszint méréshez alapvető követelmény a folyadék áramlásának biztosítása is.) A reaktorból túlfolyó biomassza gravitációsan kerül át az utóülepítőbe. Az utóülepítőben kiüledett iszapot a reaktorba egy **air lift** szerkezettel tápláljuk vissza, melynek működése szakaszos; a működési, illetve szüneti időtartamai a vezérlőszekrényen állíthatók be. Az ülepedett iszap egy része elvehető fölösiszapként is. Az utóülepítőből elfolyó tisztított víz pedig egy bukóvályúban gyűlik össze és távozik a rendszerből. A szintetikus szennyvizet membránszivattyúval, 0,6 l/h térfogatárammal tápláljuk a medencébe. Ennek összetétele 600 mg KOI/l, 50 mg NH₄-N/l, 5 mg PO₄-P/l, és emellett tartalmaz nyomelemeket is.

A **mérés menete** az alábbi lépések szerint zajlik:

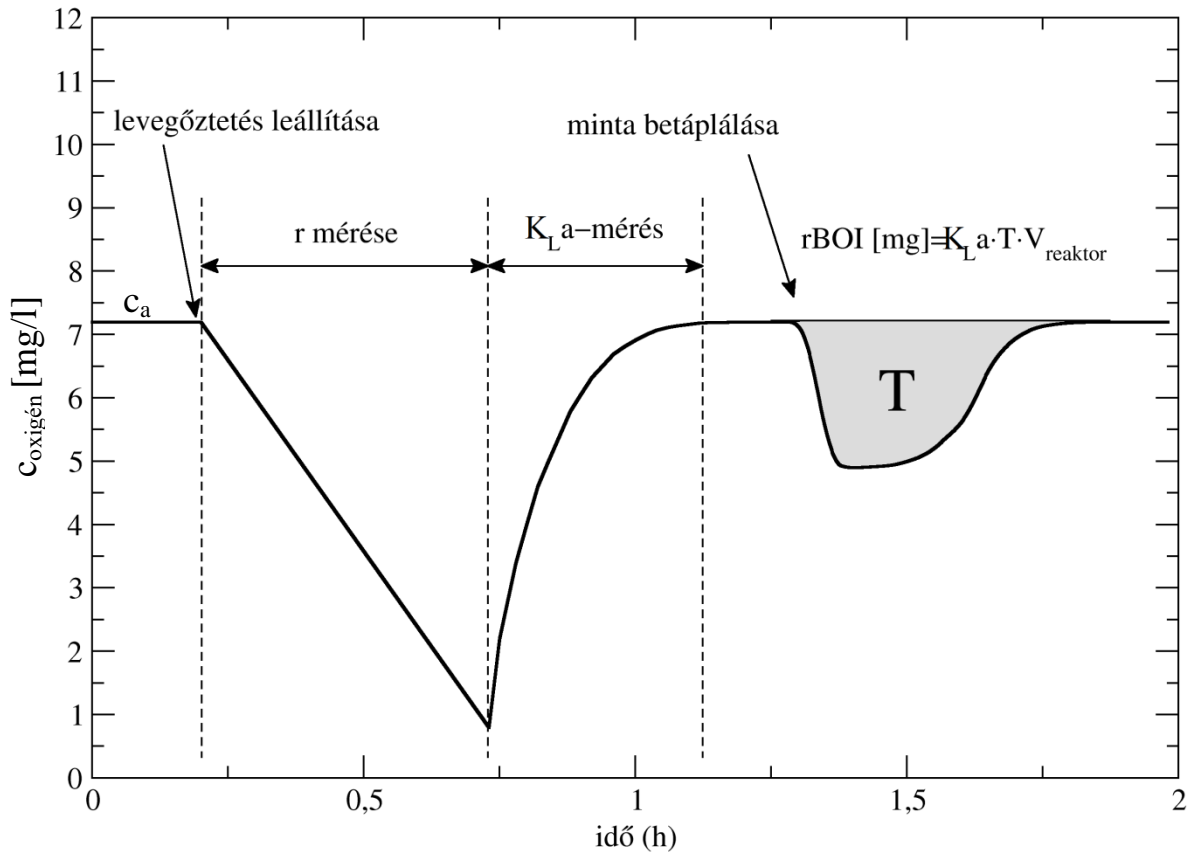
1. Leállítjuk az iszaprecirkulációt a vezérlőszekrényen jelölt kapcsolóval, hogy az utóülepítőből származó iszap visszakeverése ne zavarhassa a mérést
2. Kikapcsoljuk a műszennyvíz betáplálását a membránszivattyú leállításával, hogy a bioreaktor oxigénmérlegét szakaszos körülmények között vizsgálhassuk

3. Biztosítjuk – a rotaméterrel ellenőrizve – hogy a levegőztetés térfogatárama kb. 50 l/h értékű, majd emellett a beállítás mellett megvárjuk a szubsztrát elfogyását, azaz az egyensúlyi DO koncentráció (C_a) beállítását
4. Ha beállt a kvázi steady state koncentráció, vagyis a légzés sebessége állandósult; leállítjuk a levegőztetést, és ezzel párhuzamosan bekapcsoljuk a keverést biztosító búvárszivattyút
5. Miután az oxigénszint a lineáris profil mentén lecsökkent egy kellően alacsony értékre, a levegőztetést visszkapcsoljuk az 50 l/h térfogatáramra, hogy a telítési értékhez tartó aszimptotikus görbéből később meghatározhassuk $K_L a$ -t. (8)
6. Az egyensúlyi koncentrációra való telítődés lassú folyamat, így addig felírjuk a kísérleti vízhőmérsékletet és a laboratóriumban aktuális légköri nyomást
7. Kimérünk 50 mg KOI-nak megfelelő jól bontható szervesanyagot (pl. nátrium-acetát), illetve 20 mg NH_4-N (tehát 20 mgN!!) mennyiségnek megfelelő vegyszert (pl. ammónium-klorid); . Ehhez ki kell számítani a kikészített oldatok koncentrációja alapján a szükséges beadagolandó mennyiséget, az alábbi reakcióegyenlet szerint (Na-acetát) ill. az ammónia oldat összetétele alapján.



8. Az egyensúlyi állapot újabb elérése után az rBOI méréshez beadagoljuk a reaktorba az előkészített szerves szubsztrátot, és regisztráljuk az oldott oxigén profilt egészen addig, míg vissza nem áll a mérés előtti egyensúlyi érték
9. Az előző pontot megismételjük a kimért NH_4-N impulzus adagolásával, a nitrifikáció vizsgálatának céljából
10. Újraindítjuk a recirkulációt, illetve az adagolószivattyút; majd kivesszük a reaktorból a DO szondát és elmoszuk

A mérés menete szerint alakuló oldott oxigén koncentrációváltozásokat a következő oldalon lévő ábra szemlélteti grafikusán. Összefoglalja a mérés kiértékeléséhez használatos szakaszokat, illetve ábrázolja az rBOI számításhoz szükséges T területet is (19).



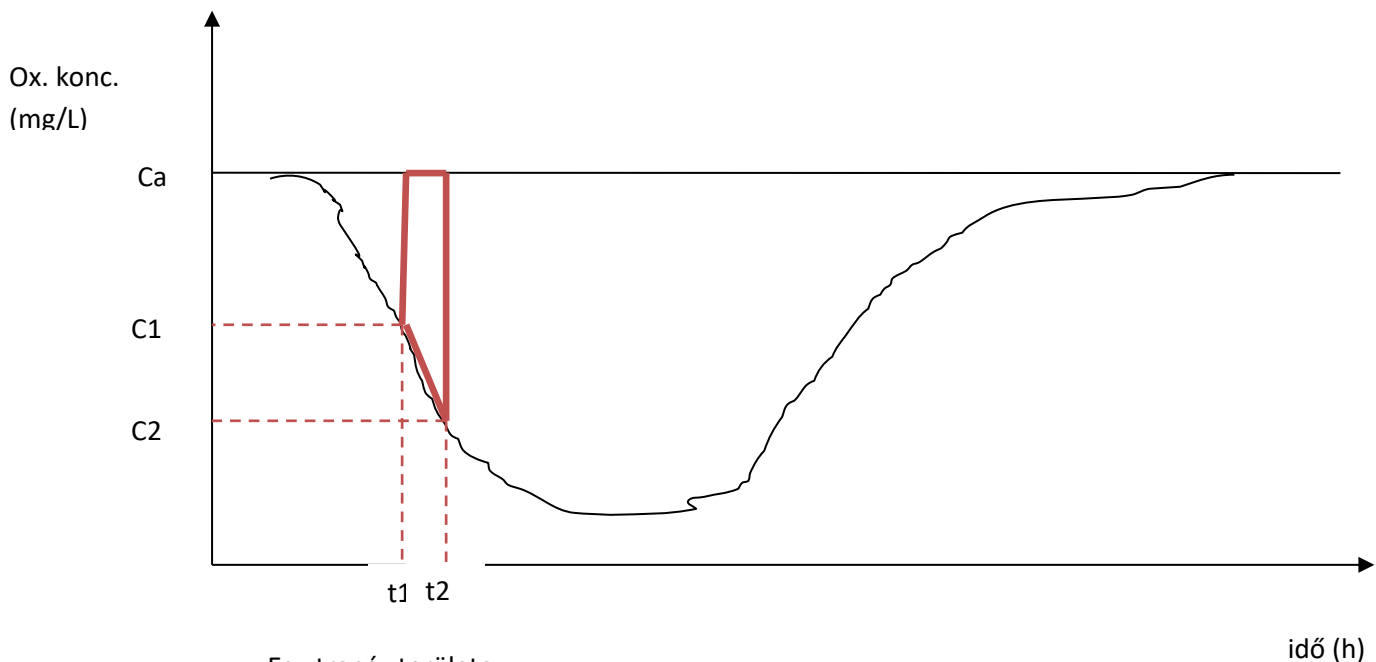
3. ábra: A mérés során változó DO profil grafikus összesítése

III. A mérés eredményeinek kiértékelése

A jegyzőkönyv tartalmazza:

- 1, A gyakorlat *tényleges* menetének rövid összefoglalását, illetve az ahhoz kapcsolatos észrevételeket, megjegyzéseket.
- 2, A bioreaktorra jellemző oxigénátadási jellemzők – $K_L a$, (lásd 4. ábra) SOTR, SOTE – értékeit, számításokkal végigvezetve; (figyelemmel a mértékegységek helyes használatára!)
- 3, A mérés során vizsgált eleveniszap endogén légzési sebességének (OUR) meghatározását (lineáris regresszió alkalmazásával)
- 4, Az rBOI számítást, eredményét összehasonlítva a bemért szubsztrát elméleti oxigénigényével, levonva a következtetéseket; illetve a nitrifikáció oxigénigényének meghatározását, a bemért $\text{NH}_4\text{-N}$ mennyiségből következtetve a fajlagos oxigénigényre (O/N), és fordítva, egy elméleti O/N arányból ellenőrizve a bemért mennyiséget ($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 = \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$)

Segédlet a görbe numerikus integrálásához („trapéz integrál”):



Egy trapéz területe:

$$((Ca-C1) + (Ca-C2))/2 * (t2-t1)$$

A két görbe közötti területeket ilyen trapézokkal kell lefedni és ezek területének az összege a két görbe közötti terület integrálja.

Irodalom:

1. Peter A. Vanrolleghem: Principles of Respirometry in Activated Sludge Wastewater Treatment
2. Sevelle Béla: Biomérnöki műveletek és folyamatok
3. Zhen He, Anurak Petiraksakul, Warawitya Meesapya: Oxygen-Transfer Measurement in Clean Water
4. Kovács Róbert: KOI, BOI, nitrogén- és foszforeltávolítás, analitikai alapok
5. Peter A. Vanrolleghem, Henri Spanjers: Comparison of two Respirometric Principles for the Determination of Short-term Biochemical Oxygen Demand
6. Laboratóriumi gyakorlati előiratok a biológiai víz- és szennyvíztisztítás c. tárgy oktatásához
7. Metcalf & Eddy Inc.: Wastewater Engineering: Treatment and Reuse