

Nghiên cứu thiết lập mô hình số tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt

Research on establishing a numerical model to calculate greenhouse gas emissions from the domestic wastewater treatment system

> VŨ THẾ HƯNG¹, ĐẶNG XUÂN HIỂN^{2*}

¹Cục kiểm soát ô nhiễm môi trường, Bộ Tài nguyên và Môi trường; Email: vuhung.dtm@gmail.com

^{2*}Khoa KHCN Môi trường, Trường Hóa và KHSS, Đại học Bách khoa Hà Nội; Email: hien.dangxuan@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải dựa trên mô hình số là phương pháp mới trên thế giới. Dựa trên các phương trình cân bằng chất của các cấu tử, bao gồm các phương trình cân bằng cơ chất, các phương trình cân bằng sinh khối trong các bể phản ứng, các hệ số động học, hệ số tỷ lệ của các chất tham gia các phản ứng sinh hóa trong hệ thống xử lý; các phương trình toán học được giải bằng phương pháp số và được code số bằng ngôn ngữ lập trình Matlab. Mô hình số giúp tính toán và dự báo về lượng phát thải khí nhà kính, đánh giá ảnh hưởng của một số thông số đến khả năng phát thải khí nhà kính, từ đó có thể lựa chọn thông số vận hành thích hợp đảm bảo tính bền vững của hệ thống xử lý.

Ứng dụng mô hình tính toán cho các nhà máy xử lý nước thải sinh hoạt tại công ty cổ phần nhựa Hà Nội đạt kết quả như sau: trong trường hợp thu hồi và đốt khí CH₄, hệ thống xử lý với công suất xử lý là 200 m³/ngày, phát thải khí nhà kính và hệ số phát thải là 91,505

kgCO_{2-tđ}/ngày và 2,34 kgCO_{2-tđ}/kgBOD. Phát thải khí nhà kính từ quá trình xử lý chiếm chủ yếu hơn 60%, phát thải khí nhà kính từ sản xuất điện năng chiếm gần 40%. Trong quá trình xử lý, phát thải khí nhà kính chủ yếu tập trung tại bể xử lý sinh học và bể phân hủy yếm khí, chiếm tỷ lệ hơn 40% tại mỗi bể.

Trong trường hợp phóng không khí CH₄, phát thải khí nhà kính tăng gấp hai lần so với trường hợp thu hồi, cụ thể lượng phát thải khí nhà kính của hệ thống là 186,156 kgCO_{2-tđ}/ngày. Xét một số yếu tố ảnh hưởng đối với hệ thống trong trường hợp thu hồi khí CH₄, kết quả cho thấy khi tăng 1°C thì tăng 3,57 kg CO_{2-tđ}, tăng nồng độ IĐ mg BOD/l thì tăng 3,13 kg CO_{2-tđ} tăng thêm 1 ngày lưu bùn thì tăng 13,04 kg CO_{2-tđ} tại bể xử lý sinh học, tại bể phân hủy yếm khí khi tăng 1°C thì giảm 1,82 kg CO_{2-tđ}, tăng nồng độ IĐ mg BOD/l thì tăng 4,45 kg CO_{2-tđ}, tăng thêm 1 ngày lưu bùn thì giảm 7,017 kg CO_{2-tđ}.

Từ khóa: Mô hình hóa tính toán phát thải khí nhà kính; phát thải khí nhà kính; hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt.

ABSTRACT

Calculating greenhouse gas emissions from wastewater treatment systems based on numerical models is a new method in the world. Based on the chemical balance equations of the components, including substrate balance equations, biomass balance equations in reaction tanks, stoichiometric coefficients of substances participating in biochemical reactions in the treatment system. Mathematical equations are solved numerically and coded using the Matlab programming language. Numerical models help calculate and forecast greenhouse gas emissions, evaluate the influence of a number of parameters on the ability to emit greenhouse gases, from which

appropriate operating parameters can be selected to ensure efficiency, sustainability of the treatment system.

Applying of numerical model for calculation of domestic wastewater treatment plants at Hanoi Plastic Joint Stock Company achieved the following results: in the case of CH₄ gas recovery and combustion, the treatment system with a treatment capacity of 200 m³/day, greenhouse gas emissions and emission factors are 91.505 kgCO₂-eq/day and 2.34 kgCO₂-eq/kgBOD. Greenhouse gas emissions from the processing process account for more than 60%, greenhouse gas emissions from electricity production account for nearly 40%. During the treatment process, greenhouse gas emissions are mainly

concentrated in biological treatment tanks and anaerobic digestion tanks, accounting for more than 40% in each tank.

In the case of CH₄ air release, greenhouse gas emissions increase two times compared to the recovery case, specifically the system's greenhouse gas emissions are 186,156 kgCO₂-eq/day. Considering a number of factors affecting the system in the case of CH₄ gas recovery, the results show that an increase of loC increases 3.57 kg CO₂-eq, an increase in concentration of 10 mg BOD/l increases 3.13 kg

CO₂-eq, increasing 1 day of sludge retention increases 13.04 kg CO₂-eq in the biological treatment tank, in the anaerobic sludge digestion tank, when increasing loC, the decrease is 1.82 kg CO₂-eq, increasing the concentration by 10 mg BOD /l increases 4.45 kg CO₂-eq, increasing 1 day of sludge retention reduces 7.017 kg CO₂-eq.

Keywords: Modeling and calculating greenhouse gas emissions; greenhouse gas emissions; domestic wastewater

1. GIỚI THIỆU

Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu tác động mạnh mẽ đến môi trường trái đất và đời sống của con người. Các hiện tượng dị thường thời tiết như lũ lụt, bão, hạn hán, băng ở Bắc cực và Nam cực đang dần dần tan với tốc độ nhanh,... đều là hệ quả của biến đổi khí hậu. Nguyên nhân chính là do phát thải khí nhà kính. Một trong các nguồn phát thải khí nhà kính như CO₂, CH₄ và N₂O có nguồn gốc từ các nhà máy xử lý nước thải.

Hệ thống xử lý nước thải là một trong những nguồn phát thải khí nhà kính ngày càng được quan tâm nhiều hơn. Phát thải khí nhà kính trực tiếp từ hệ thống xử lý nước thải gồm: phát thải trực tiếp từ quá trình xử lý như từ bể xử lý hiếu khí, bể xử lý yếm khí, bể phân hủy yếm khí, rò rỉ khí sinh học, quá trình đông keo tụ hóa học, đốt khí sinh học trong nồi hơi thu hồi.

Hiện nay, trong tổng kiểm kê quốc gia khí nhà kính tại Việt Nam, tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải là một vấn đề đang bỏ ngỏ. Nghiên cứu mô hình tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải là một quan điểm khá mới mẻ, giúp giảm thiểu chi phí đo đạc, nhanh chóng có được bộ số liệu dự báo về lượng phát thải khí nhà kính và là công cụ hữu hiệu trong đánh giá tính bền vững của một hệ thống xử lý nước thải, nhằm có chiến lược giảm phát thải khí nhà kính và góp phần trong công tác ứng phó với biến đổi khí hậu tại Việt Nam.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

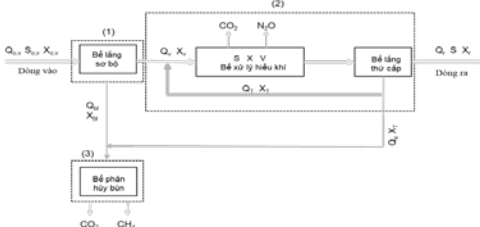
2.1. Đối tượng nghiên cứu và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt sử dụng công nghệ xử lý sinh học thiếu khí - hiếu khí và phân hủy bùn yếm khí. Các số liệu tính toán áp dụng cho Hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt của Công ty CP nhựa Hà Nội và số liệu của một số hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt khác;

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng một số phương pháp như: phương pháp mô hình hóa, phương pháp mô phỏng số, phương pháp phân tích trong phòng thí nghiệm, kỹ thuật thống kê để xử lý các số liệu thực nghiệm và phương pháp phân tích so sánh.

3. Nghiên cứu thiết lập mô hình tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt



Hình 3.1: Sơ đồ hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt Thiết lập mô hình số tính toán phát thải khí nhà kính từ quá trình

xử lý nước thải trên cơ sở: phương trình cân bằng khối lượng cơ chất và phương trình cân bằng nồng độ sinh khối và các phản ứng hóa sinh xảy ra trong quá trình xử lý (giả thiết với nước thải sinh hoạt, công thức C₁₀H₁₉NO₃ được sử dụng đại diện cho cơ chất hữu cơ [1; 2; 3; 9]; C₅H₇O₂N được sử dụng đại diện cho sinh khối).

3.1. Tính toán phát thải khí nhà kính từ bể xử lý hiếu khí

a. Tính toán ở đường biên 1

Chất rắn lơ lửng trong nước thải được loại bỏ tại bể lắng sơ cấp. Bùn lắng sơ cấp được đưa đến bể phân hủy bùn. Lượng BOD₅ và SS được loại bỏ trong bể lắng sơ cấp được tính như sau:

$$SS_{khu,bl} = Pr_{bl,SS} \times Q_{o,v} \times SS_{o,v} \tag{3.1}$$

$$BOD_{khu,bl} = Pr_{bl,BOD} \times Q_{o,v} \times S_{o,v} \tag{3.2}$$

Trong đó:

SS_{khu,bl}: lượng SS bị loại bỏ trong bể lắng sơ cấp (g/ngày)

BOD_{khu,bl}: lượng BOD₅ bị loại bỏ trong bể lắng sơ cấp (g/ngày)

Q_{o,v}: Lưu lượng dòng vào hệ thống xử lý (m³/ngày)

SS_{o,v}: Nồng độ chất rắn lơ lửng dòng vào hệ thống xử lý (mg/l)

S_{o,v}: Nồng độ cơ chất dòng vào hệ thống xử lý (mg/l)

Pr_{bl,SS}: phần trăm SS bị loại bỏ trong bể lắng sơ cấp (%)

Pr_{bl,BOD}: phần trăm BOD₅ bị loại bỏ trong bể lắng sơ cấp (%)

b. Tính toán ở đường biên 2

*** Cân bằng khối lượng sinh khối**

Phương trình cân bằng sinh khối (bùn hoạt tính) trong bể xử lý hiếu khí như sau:

$$V \cdot \frac{dX}{dt} = Q_v \cdot X_v - (Q_r \cdot X_r + Q_x \cdot X_r) + r_x \cdot V \tag{3.3}$$

$$r_x = -Y \cdot r_s - k_d \cdot X \quad ; r_s = -\frac{k \cdot X \cdot S}{K_s + S} \quad k = \frac{\mu_m}{Y} \tag{3.4}$$

Trong đó:

V: Thể tích bể hiếu khí (m³)

($\frac{dX}{dt}$): Tốc độ thay đổi sinh khối theo thời gian (g/m³.ngày)

X_v: Nồng độ sinh khối có trong nước đi vào bể, thường không đáng kể (mg/l)

X_r: Nồng độ sinh khối dòng ra (mg/l)

X_T: Nồng độ sinh khối lấy từ đáy bể lắng thứ cấp, tuần hoàn lại bể hiếu khí (mg/l)

X: Nồng độ sinh khối trong bể hiếu khí (mg/l)

S: Nồng độ cơ chất trong bể hiếu khí (mg/l)

Q_v: Lưu lượng nước thải dòng vào (m³/ngày)

Q_r: Lưu lượng nước thải dòng ra (m³/ngày)

Q_x: Lưu lượng xả bùn (m³/ngày)

r_x: Tốc độ tăng trưởng sinh khối thực trong bể hiếu khí (g/m³.ngày)

r_s: Tốc độ sử dụng cơ chất trong bể hiếu khí (mg/l.ngày)

Y: hệ số năng suất sử dụng cơ chất cực đại (mg VSS/mg BOD₅)

k_d: Hệ số phân hủy nội bào (ngày⁻¹)

k: Tốc độ sử dụng chất nền riêng cực đại (mg cơ chất/mg sinh khối.ngày)

μ_m: Tốc độ tăng trưởng riêng cực đại (g/g.ngày)

K_s: Hằng số bán tốc độ (mg/l).

Các giả thiết: trong điều kiện trạng thái ổn định, $\frac{dX}{dt} = 0$; Nồng độ bùn hoạt tính dòng vào coi là không đáng kể ($X_v = 0$); lưu lượng bùn xả ở bể lắng sơ cấp được coi là không đáng kể so với lưu lượng nước thải vào bể ($Q_{bl} = 0$). Từ đó phương trình 3.3 sẽ được biểu diễn như sau: $\frac{(Q_r \cdot X_r + Q_x \cdot X_T)}{V \cdot X} = Y \frac{kS}{K_S + S} - k_d$ (3.5)

Thời gian lưu của bùn hay còn gọi là tuổi bùn: $SRT = \frac{V \cdot X}{(Q_r \cdot X_r + Q_x \cdot X_T)}$ (3.6)

Nồng độ sinh khối trong bể hiếu khí tính theo công thức: $S = \frac{K_S [1 + k_d \cdot SRT]}{SRT \cdot (Yk - k_d) - 1}$ (3.7)

*** Cân bằng khối lượng cơ chất**

Phương trình cân bằng khối lượng cơ chất trong bể xử lý hiếu khí: $V \cdot \frac{dS}{dt} = Q_v \cdot S_v - (Q_r \cdot S + Q_x \cdot S) + r_s \cdot V$ (3.8)

Ở điều kiện trạng thái ổn định, $\frac{dS}{dt} = 0$ ta có: $(S_v - S) = \frac{V}{Q_v} \cdot \frac{kXS}{K_S + S}$ (3.9)

Với $HTR = \frac{V}{Q_v}$, nồng độ sinh khối trong bể hiếu khí tính theo công thức: $X = \left(\frac{SRT}{HTR} \right) \left\{ \frac{Y \cdot (S_v - S)}{1 + k_d \cdot SRT} \right\}$ (3.10)

Với S_v được tính bằng cách sử dụng công thức khử BOD₅ trong bể lắng sơ cấp: $S_v = S_{0,v} - \frac{BOD_{khu,bl}}{Q_v}$ (3.11)

Tương tự, trong trường hợp hệ thống có xử lý nito, nồng độ sinh khối tự dưỡng được tính theo:

$X_{nit} = \left(\frac{SRT_{nit}}{HTR} \right) \left\{ \frac{Y_{nit} \cdot N}{1 + k_{nit} \cdot SRT_{nit}} \right\}$ (3.12)

Trong đó:

- X_{nit} : Nồng độ sinh khối tự dưỡng (mg/l)
- Y_{nit} : Hệ số năng suất cực đại đối với vi khuẩn xử lý nito (mg/mg)
- N : Nồng độ N-NH₄ dòng vào mà bị oxy hóa thành nitrat (mg/l)
- k_{nit} : Hệ số phân hủy nội bào đối với vi khuẩn xử lý nito (ngày⁻¹)

*** Lượng bùn tạo ra**

Lượng bùn tạo ra mỗi ngày trong bể hiếu khí được tính theo công thức sau:

$P_X = \frac{X_r \cdot V}{SRT} = P_{X,BOD} + P_{X,manhthebao} + P_{X,nbVSS} + P_{X,nit}$ (3.13)

Lượng bùn tạo ra do tiêu thụ cơ chất bởi vi sinh vật dị dưỡng, tiêu thụ cơ chất bởi vi sinh vật khử nito và mảnh tế bào

$P_{X,BOD} = \frac{Q_v \cdot Y \cdot (S_v - S)}{1 + k_d \cdot SRT}$ (3.14)

$P_{X,nbVSS} = Q_v \cdot X_{nbVSS}$ (3.15)

$P_{X,manhvotebao} = f_d \cdot k_d \cdot X \cdot V$ (3.16)

$P_{X,nit} = \frac{Q_v \cdot Y_{nit} \cdot N}{1 + k_{d,nit} \cdot SRT}$ (3.17)

Trong đó: $X_T = X + X_{nb} + X_{nit}$ (3.18)

X : Nồng độ sinh khối dị dưỡng trong bể sinh học (mg/l)

X_{nit} : Nồng độ sinh khối trong quá trình nitrat hóa (mg/l)

X_{nb} : Nồng độ sinh khối không phân hủy sinh học và sinh ra do mảnh tế bào vụn (mg/l)

X_{nb} được tính theo công thức sau đây:

$X_{nb} = \frac{f_d \cdot k_d \cdot X \cdot SRT}{manhthebao} + \frac{X_{nbVSS} \cdot SRT}{VSS_{khongphanhuysH}}$ (3.19)

Mặt khác, phương trình cân bằng đối với khử nito như sau:

Nito bị oxy hóa = Nito dòng vào – Nito dòng ra – Nito trong sinh khối $Q_v \cdot N = Q_v \cdot TN_v - Q_r \cdot TN_r - 0,12 \cdot P_X$ (3.20)

$N = TN_v - TN_r - \frac{0,12 \cdot P_{X,bio}}{Q_v}$ (3.21)

$P_{X,bio} = P_X - P_{X,nbVSS}$ (3.22)

Để tính lượng nito bị oxy hóa, trước tiên giả thiết $N = 0,8 N_v$ từ đó tính được lượng bùn tạo ra do vi sinh vật khử nito $P_{X,nit}$ theo công thức (3.17), tiếp đó theo công thức (3.21) tính được lượng nito bị oxy hóa mới. Quá trình được lặp lại cho đến khi tìm ra được giá trị của

lượng nito bị oxy hóa.

c. Tính toán lượng phát thải khí nhà kính từ bể xử lý hiếu khí

Lượng phát thải khí CO₂ tạo ra từ việc xử lý BOD₅ được tính theo công thức sau:

$M_{CO2,khuBOD} = Y_{CO2} \cdot (Q_v(S_v - S) - r_{O2,phanhuy} \cdot P_{X,BOD})$ (3.23)

Lượng khí CO₂ bị tiêu thụ do quá trình nitrat hóa, quá trình khử nitrat và quá trình phân hủy sinh khối do thiếu cơ chất hoặc chất dinh dưỡng và được tính theo các công thức sau:

$M_{CO2,tieuthunit} = r_{CO2,nit} \cdot N \cdot Q_v$ (3.24)

$M_{CO2,dnt} = Y_{CO2,dnt} \cdot N \cdot Q_v$ (3.25)

$M_{CO2,VSSphanhuy} = Y_{CO2,phanhuy} \cdot VSS_{phanhuy}$ (3.26)

Trong đó, lượng phân hủy sinh khối được tính khoảng 85% lượng bùn tạo ra do xử lý sinh học [7; 8].

$VSS_{phanhuy} = 0,85 \cdot V \cdot (k_d \cdot X + k_{dn} \cdot X_{nit})$ (3.27)

$VSS_{phanhuy} = 0,85 \cdot SRT \cdot Q_v \cdot \left(\frac{k_d \cdot Y \cdot (S_v - S)}{1 + k_d \cdot SRT} + \frac{k_{dn} \cdot Y_{n-N}}{1 + k_{dn} \cdot SRT} \right)$ (3.28)

Vậy, tổng lượng phát thải khí CO₂ từ bể hiếu khí được tính theo công thức sau:

$M_{CO2,bexl} = M_{CO2,khuBOD} + M_{CO2,VSSphanhuy} + M_{CO2,dnt} - M_{CO2,tieuthunit}$ (3.29)

3.2. Tính toán phát thải khí nhà kính từ bể phân hủy bùn yếm khí

*** Tính toán ở đường biên 3**

Lượng phát thải khí nhà kính từ quá trình phân hủy bùn sinh học được tính theo:

$m_{CH4,bepanhuy} = Y^{dr}_{CH4,dcy} \cdot P_{bunsinhhoc}$ (3.30)

$m_{CO2,bepanhuy} = Y^{dr}_{CO2,dcy} \cdot P_{bunsinhhoc}$ (3.31)

$P_{bunsinhhoc} = 0,8 \cdot P_{X,bio}$ (3.32)

Trong trường hợp thu gom khí CH₄ và phóng không, lượng khí nhà kính từ bể phân hủy yếm khí tính theo:

$M_{CO2,bepanhuy,pk} = m_{CO2,bepanhuy} + 25 \cdot m_{CH4,bepanhuy}$ (3.33)

Trong trường hợp thu gom khí CH₄ và đem đốt, lượng khí nhà kính từ bể phân hủy yếm khí tính theo:

$m_{CH4,phanhuy,rori} = Pr_{CH4,rori} \cdot m_{CH4,bepanhuy}$ (3.34)

$m_{CH4,phanhuy,thuhoi} = m_{CH4,bepanhuy} - m_{CH4,phanhuy,rori}$ (3.35)

$m_{CO2-tđ,phanhuymetan} = Y_{CH4,dot} \cdot m_{CH4,phanhuythuhoi} + 25 \cdot m_{CH4,phanhuyrori}$ (3.36)

$M_{CO2,bepanhuy,dot} = m_{CO2,bepanhuy} + m_{CO2-tđ,phanhuymetan}$ (3.37)

3.3. Tính toán phát thải khí nhà kính từ phân hủy BOD₅ dòng ra

BOD₅ hòa tan dòng ra được phân hủy trong dòng tiếp nhận và đóng góp vào phát thải khí nhà kính. Khi chất hữu cơ bị oxy hóa thì: 0,33 gCO₂/gBOD₅ và 0,422 gVSS/gBOD₅ được tạo ra. Hơn nữa, sinh khối bị phân hủy tạo ra 1,56 gCO₂/gVSS. Do vậy, lượng CO₂ tạo ra do BOD₅ dòng ra được tính theo công thức:

$M_{CO2,BODra} = (Y_{CO2} + Y_{VSS} \cdot Y_{CO2,phanhuy}) \cdot S \cdot Q_r$ (kgCO₂/ng) (3.38)

3.4. Tính toán phát thải khí N₂O từ hệ thống xử lý

Lượng khí N₂O được phát thải trực tiếp từ hệ thống xử lý nước thải hoặc gián tiếp từ dòng nước thải chảy vào nguồn tiếp nhận (sông, hồ, biển). Phát thải trực tiếp từ quá trình nitrat hóa và khử nitrat trong hệ thống xử lý nước thải được xem như là nguồn thứ yếu, phát thải này rất nhỏ và chỉ có thể được quan tâm ở quốc gia có hệ thống xử lý nước thải tập trung tiên tiến chiếm ưu thế với các bước nitrat hóa và khử nitrat.

* Lượng phát thải N₂O gián tiếp từ dòng ra nước thải vào nguồn tiếp nhận: Phát thải N₂O = N_{dòng ra} * EF_{dòng ra} * 44/28 (3.39)

Trong đó:

Phát thải N₂O: phát thải N₂O trong năm kiểm kê, kgN₂O/năm

EF_{dòng ra}: Hệ số phát thải đối với phát thải N₂O từ dòng ra vào nguồn tiếp nhận, kg N₂O/kgN; hệ số phát thải mặc định là 0,005; giá trị thông thường (0,0005 – 0,25) kgN₂O-N/kgN.

Hệ số 44/28 là chuyển hóa của kg N₂O – N thành kg N₂O.

$N_{dòng ra}$: Nito trong dòng nước thải ra vào nguồn tiếp nhận, kgN/năm.

* Lượng phát thải khí N_2O từ hệ thống xử lý nước thải tập trung
 $N_2O_{htxInt} = P * T_{htxInt} * F_{IND-COM} * EF_{htxInt}$ (3.40)

Trong đó:

N_2O_{htxInt} : Tổng phát thải N_2O từ hệ thống xử lý nước thải trong năm kiểm kê, kg N_2O /năm

P: Dân số (người)

T_{htxInt} : Mức độ sử dụng hệ thống (%)

$F_{IND-COM}$: Hệ số protein cùng thải nước thải công nghiệp và thương mại vào hệ thống cống thoát (giá trị mặc định: 1,25)

EF_{htxInt} : Hệ số phát thải, 3,2g N_2O /người/năm

3.5. Tính toán phát thải khí nhà kính trong điều kiện không ổn định

Mô hình động học được phát triển dựa trên họ mô hình bùn hoạt tính (ASM). Đơn giản hóa các thành phần khác nhau của mô hình bùn hoạt tính được mô tả dưới đây: chất hữu cơ tro không tham gia bất kỳ hoạt động nào trong quá trình sinh học; trong quá trình vận hành hệ thống, pH được kiểm soát, chất dinh dưỡng bổ sung theo yêu cầu hệ thống, độ kiềm và nồng độ nitơ được xem xét như là những thông số không giới hạn; sinh khối tự dưỡng, nitrat, nitrit, amoni, nito hữu cơ có khả năng phân hủy sinh học hòa tan, nito hữu cơ có khả năng phân hủy sinh học dạng hạt không bao gồm trong mô hình vì chủ yếu là xem xét đến khả năng phân hủy carbon; ô xy được cung cấp đủ. Các sản phẩm dạng hạt gia tăng do phân hủy sinh khối cũng không được xét tới do nồng độ cơ chất có khả năng phân hủy sinh học cao hơn trong hệ thống, vì vậy giá trị X và S là chỉ số nồng độ sinh khối và nồng độ cơ chất trong hệ thống.

Từ phương trình 3.3 và 3.8, các giá trị S và X được viết lại như sau:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{S_v}{HRT} - \frac{S}{HRT} - \frac{\mu_{max}}{Y(K_S+S)} \quad (3.41)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X_v}{HRT} - \frac{X}{SRT} + \left(\frac{Y \cdot k_s}{K_S+S} - k_d \right) \cdot X \quad (3.42)$$

Sử dụng giá trị các hệ số động học, giải hệ phương trình vi phân bằng phương pháp số, kết quả thu được nghiệm số S(t) và X(t), từ đó xác định được thời gian hệ thống chạy ổn định.

3.6. Xác định hệ số động học của hệ thống xử lý

a. Xác định hệ số K_s và k

Tốc độ sử dụng cơ chất tính theo hiệu quả làm sạch hệ thống, có công thức: $r_s = -\frac{Q_v}{V} (S_o - S) = \frac{S_o - S}{HRT}$ (3.43)

Từ công thức 2.8 và 2.53 có công thức: $\frac{HRT \cdot X}{S_o - S} = \frac{K_S}{k} \cdot \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$ (3.44)

Phương trình 2.54 biểu diễn dưới dạng đồ thị của đường thẳng: $y = a \cdot x + b$ với trục tung $y = \frac{HRT \cdot X}{S_o - S}$; trục hoành $x = \frac{1}{S}$; Hệ số $a = \frac{K_S}{k}$ và hệ số $b = \frac{1}{k}$

Đo các thông số: S, X, S_o , Q, V và tính toán các giá trị $\frac{HRT \cdot X}{S_o - S}$; $\frac{1}{S}$ của các lần đo và biểu diễn lên đồ thị. Đường thẳng $y = a \cdot x + b$ cắt trục tung tại điểm nào thì đó chính là giá trị $\frac{1}{k}$, độ dốc đường thẳng $tga = a = \frac{K_S}{k}$. Từ đó tính được giá trị K_s và k .

b. Xác định hệ số k_d và Y

Từ phương trình 3.1, 3.2, 3.3 ta có phương trình 3.45:

$$\frac{1}{SRT} = Y \frac{S_o - S}{HRT \cdot X} - k_d \quad (3.45)$$

Phương trình 3.45 biểu diễn dưới dạng đồ thị của đường thẳng: $y = a \cdot x + b$ với trục tung $y = \frac{1}{SRT}$; trục hoành $x = \frac{S_o - S}{HRT \cdot X}$; Hệ số $a = Y$ và hệ số $b = -k_d$

Đo các thông số: S, X, S_o , Q, V, Q_r , X_r , Q_x , X_T và tính toán các giá trị $\frac{1}{SRT}$ và $\frac{S_o - S}{HRT \cdot X}$ của các lần đo và biểu diễn lên đồ thị. Đường thẳng $y = a \cdot x + b$ cắt trục tung tại điểm nào thì đó chính là giá trị $-k_d$, độ dốc

đường thẳng $tga = a = Y$. Từ đó tính được giá trị k_d và Y.

c. Hệ số động học trong quá trình xử lý nước thải

Nhiệt độ của nước ảnh hưởng rất lớn đến tốc độ của phản ứng sinh hóa trong quá trình xử lý nước thải. Nhiệt độ không chỉ ảnh hưởng đến hoạt động chuyển hóa của vi sinh vật mà còn có tác động lớn đến quá trình hấp thụ khí oxy vào nước thải và quá trình lắng các bông bùn hoạt tính ở bể lắng thứ cấp. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến tốc độ phản ứng sinh hóa được biểu diễn bằng công thức [9]: $r_T = r_{20} * \theta^{(T-20)}$ (3.46)

Trong đó:

r_T : Hệ số tốc độ phản ứng tại nhiệt độ (°C); r_{20} : Hệ số tốc độ phản ứng tại 20°C; θ : Hệ số nhiệt độ; T: Nhiệt độ (°C)

Các hệ số động học của quá trình xử lý hiếu khí tại điều kiện tiêu chuẩn 20°C được thể hiện tại bảng 3.1 [9]:

Bảng 3.1. Giá trị đặc trưng hệ số động học trong quá trình xử lý hiếu khí

Hệ số	Đơn vị	Giá trị tiêu chuẩn ở 20°C	
		Khoảng dao động	Giá trị tiêu biểu
μ_m	1/ng	3,0-13,2	6,0
K	1/ngày	2-10	4,0
K_s	mgBOD/l	25-100	60
	mgCOD/l	15-70	40
Y	mgVSS/mgBOD	0,4-0,8	0,6
	mgVSS/mgCOD	0,3-0,6	0,4
k_d	1/ngày	0,06-0,15	0,1
f_d	-	0,08-0,2	0,15
Giá trị θ			
μ_m	-	1,03-1,08	1,07
k_d	-	1,03-1,08	1,04
K_s	-	1,00	1,00

Các hệ số động học của quá trình xử lý yếm khí tại điều kiện tiêu chuẩn 20°C được thể hiện tại bảng 3.2 [2]:

Bảng 3.2. Giá trị đặc trưng hệ số động học trong quá trình xử lý yếm khí

Thông số	Đơn vị	Giá trị tiêu chuẩn ở 20°C	
		Khoảng dao động	Giá trị tiêu biểu
$\mu_{m,an}$	1/ngày	0,18-0,24	0,2
Y_{an}	mg/mg	0,05-0,1	0,08
$K_{S,an}$	mg/l	800-1100	900
$k_{d,an}$	1/ngày	0,02-0,04	0,03
$f_{d,an}$	-		0,15

Các hệ số động học của quá trình nitrat tại điều kiện tiêu chuẩn 20°C được thể hiện tại bảng 3.3 [2]:

Bảng 3.3. Giá trị đặc trưng hệ số động học trong quá trình nitrat

Thông số	Đơn vị	Giá trị tiêu chuẩn ở 20°C	
		Khoảng dao động	Giá trị tiêu biểu
$\mu_{m,nit}$	1/ngày	0,2-0,9	0,75
K_N	mg NH_4-N /l	0,5-1,0	0,74
Y_{nit}	mgVSS/mg NH_4-N	0,1-0,15	0,12
$k_{d,nit}$	1/ngày	0,05-0,15	0,08
K_o	mg/l	0,4-0,6	0,5
Giá trị θ			
μ_{nit}	-	1,06-1,123	1,07
K_N	-	1,03-1,123	1,053
$k_{d,nit}$	-	1,03-1,08	1,04

3.7. Thiết lập hệ số chuyển đổi (Y)

3.7.1. Vi sinh vật và các phương trình hóa học trong quá trình xử lý sinh học

Bước đầu tiên trong tính toán phát thải khí nhà kính là xây dựng các phương trình hóa học đối với các quá trình xử lý sinh học. Theo Rittman and McCarty (2001), phương pháp tiếp cận bán phản ứng là cách tốt nhất cho tính chất nước thải hỗn hợp và phản ứng phức tạp. Trong

phương pháp tiếp cận này, bán phản ứng đối với tổng hợp tế bào cũng như bán phản ứng nhận điện tử được thể hiện bằng R_c and R_a tương ứng; bán phản ứng cho điện tử được thể hiện bằng R_d .

$$R_e = R_a - R_d \quad (3.47)$$

$$R_s = R_c - R_d \quad (3.48)$$

Trong phương pháp này, f_s là tỷ lệ điện tử (electrons) được sử dụng để tổng hợp tế bào và chúng được chuyển hóa thành sinh khối và f_e là tỷ lệ điện tử được tiêu thụ để tạo năng lượng. Phản ứng tổng hợp đối với sản sinh năng lượng và tổng hợp tế bào như sau [2;6]:

$$R = f_e \cdot (R_a - R_d) + f_s \cdot (R_c - R_d) = f_e \cdot R_a + f_s \cdot R_c - R_d \quad (3.49)$$

Trong đó:

R : Phản ứng tổng đã được cân bằng

R_a : Bán phản ứng đối với chất nhận điện tử

R_c : Bán phản ứng tổng hợp tế bào

R_d : Bán phản ứng đối với chất cho điện tử

f_e : Tỷ lệ điện tử nhận được dùng để tạo năng lượng

f_s : Tỷ lệ điện tử nhận được dùng để tổng hợp tế bào: $f_e + f_s = 1$

Các phương trình phản ứng hóa học xảy ra trong quá trình xử lý sinh học được tổng hợp trong bảng dưới đây [2].

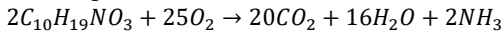
3.7.2. Phương trình hóa học trong xử lý nước thải sinh hoạt

a. Quá trình hiếu khí

Để thiết lập phản ứng tổng hợp đối với quá trình hiếu khí trong xử lý nước thải, chất nhận điện tử (electron) là oxi và chất cho điện tử là các hợp chất hữu cơ. Giả thiết 60% điện tử giành cho tổng hợp tế bào ($f_s = 0,6$) và 40% điện tử giành cho năng lượng ($f_e = 0,4$) [6]

$R = f_e \cdot R_a + f_s \cdot R_c - R_d \quad (3.50)$
$0,1O_2 + 0,4H^+ + 0,4e^- \rightarrow 0,2H_2O$
$0,12CO_2 + 0,03NH_4^+ + 0,03HCO_3^- + 0,6H^+ + 0,6e^- \rightarrow 0,03C_5H_7O_2N + 0,27H_2O$
$0,02C_{10}H_{19}NO_3 + 0,36H_2 \rightarrow 0,18CO_2 + 0,02NH_4^+ + 0,02HCO_3^- + H^+ + e^-$
$R: 0,02C_{10}H_{19}NO_3 + 0,01NH_4^+ + 0,01HCO_3^- + 0,1O_2 \rightarrow 0,03C_5H_7NO_2 + 0,11H_2O + 0,06CO_2$

Phản ứng oxi hóa hoàn toàn BOD:



$$BOD_{tronggcochat} = \frac{25x32gBOD}{2x201gcochat} = 2 \frac{gBOD}{gcochat}$$

Hệ số chuyển đổi Y đối với khí CO_2 và tổng hợp sinh khối cũng như tốc độ sử dụng oxi được tính theo các công thức:

$$Y_{CO_2} = \frac{0,06x44gCO_2}{0,02x201gcochatx2 \frac{gBOD}{gcochat}} = 0,33 \frac{gCO_2}{gBOD}$$

$$Y_{VSS} = \frac{0,03x113gVSS}{0,02x201gcochatx2 \frac{gBOD}{gcochat}} = 0,42 \frac{gVSS}{gBOD}$$

$$r_{O_2} = \frac{0,1x32gO_2}{0,02x201gcochatx2 \frac{gBOD}{gcochat}} = 0,40 \frac{gO_2}{gBOD}$$

Bằng cách sử dụng tiếp cận tương tự ta có phản ứng phân rã sinh khối như sau: $R: 0,05C_5H_7O_2N + 0,25O_2 \rightarrow 0,2CO_2 + 0,05NH_4^+ + 0,05HCO_3^- + 0,05H_2O$

Hệ số chuyển đổi đối với khí CO_2 và tốc độ phản ứng sử dụng oxi trong quá trình phân rã sinh khối như sau:

$$Y_{CO_2,phanhuy} = \frac{0,2x44}{0,05x113} = 1,56 \frac{gCO_2}{gVSS}$$

$$r_{O_2,phanhuy} = \frac{0,25x32kgO_2}{0,05x113} = 1,42 \frac{gO_2}{gVSS}$$

b. Bể phân hủy yếm khí

Các phản ứng sau xác định các phương trình chính thực hiện trong bể phân hủy bùn yếm khí đối với bùn thải từ các bể xử lý sinh học. Trong bể phân hủy bùn yếm khí, thừa nhận $f_s = 0,05$ and $f_e = 0,95$ [6].

Phương trình tổng quát như sau:

$R = f_e \cdot R_a + f_s \cdot R_c - R_d \quad (3.51)$
$0,118CO_2 + 0,95H^+ + 0,95e^- \rightarrow 0,118CH_4 + 0,24H_2O$
$0,01CO_2 + 0,003NH_4^+ + 0,003HCO_3^- + 0,05H^+ + 0,05e^- \rightarrow 0,003C_5H_7O_2N + 0,023H_2O$
$0,034C_7H_{12}O_4N + 0,379H_2O \rightarrow 0,207CO_2 + 0,034NH_4^+ + 0,034HCO_3^- + H^+ + e^-$
$R: 0,034C_7H_{12}O_4N + 0,117H_2O \rightarrow 0,003C_5H_7O_2N + 0,118CH_4 + 0,079CO_2 + 0,031NH_4^+ + 0,031HCO_3^-$

Hệ số tính toán CO_2 , CH_4 , VSS and độ kiềm trong phương trình trên như sau:

$$Y \frac{0,079x44}{0,034x174x1,33} \frac{gCO_2}{gBOD_{CO_2,dr}}$$

$$Y \frac{0,003x113}{0,034x174x1,33} \frac{gVSS}{gBOD_{VSS,dr}}$$

$$Y \frac{0,118x16}{0,034x174x1,33} \frac{gCH_4}{gBOD_{CH_4,dr}}$$

Bằng cách tiếp cận tương tự ta có phản ứng phân hủy sinh khối như sau: $R: 0,05C_5H_7O_2N + 0,2H_2 \rightarrow 0,075CO_2 + 0,125CH_4 + 0,05NH_4^+ + 0,05HCO_3^-$

Hệ số chuyển đổi tạo khí CO_2 , CH_4 và độ kiềm trong phản ứng phân hủy sinh khối như sau:

$$Y_{CO_2,phanhuy}^{dr} = \frac{0,075x44}{0,05x113} = 0,58 \frac{gCO_2}{gVSS}$$

$$Y_{CH_4,phanhuy}^{dr} = \frac{0,125x16}{0,05x113} = 0,35 \frac{gCH_4}{gVSS}$$

Từ cơ sở lý thuyết thiết lập công thức tính toán phát thải khí nhà kính phát sinh từ một số hệ thống xử lý nước thải dựa trên phương cân bằng cơ chất, cân bằng sinh khối, cân bằng hóa học xảy ra trong quá trình xử lý nước thải, kết hợp phương pháp giải số và ngôn ngữ lập trình Matlab, nghiên cứu đã thiết lập được phần mềm tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Phân tích độ nhạy

Do có nhiều thông số động học nên việc phân tích độ nhạy đánh giá mức độ ảnh hưởng của chúng tới kết quả đầu ra là rất quan trọng. Đây là bước đầu tiên trong quá trình thực hiện mô hình, rất cần thiết cho quá trình hiệu chỉnh mô hình để tập trung hơn vào các thông số quan trọng nhằm giảm thiểu thời gian tính toán.

Bảng 3.4. Khoảng giá trị của các thông số động học hiếu khí (ở 20°C) [5;10;11]

Thông số	k	k_d	K_s	Y
Giá trị	2 ÷ 10	0,02 ÷ 0,2	25 ÷ 100	0,4 ÷ 0,8

Trước tiên, cần xác định ảnh hưởng của sự biến động các thông số động học đến đầu ra của mô hình thông qua độ lệch chuẩn của các thông số động học. Độ nhạy của mô hình được đánh giá đối với nồng độ cơ chất.

Bảng 3.5. Kết quả phân tích độ nhạy

Độ lệch chuẩn theo nồng độ cơ chất (mg/l)	Bề hiếu khí			
	k	k_s	Y	k_d
	4,05	2,64	1,81	0,97

Qua bảng trên cho thấy các thông số k trong mô hình là nhạy nhất do chúng có độ lệch chuẩn rất cao. Điều này cho thấy chúng có sự tương tác rất lớn với các thông số khác và thể hiện mức độ ảnh hưởng mạnh với các biến đầu ra, vì vậy cần hiệu chỉnh các thông số này phù hợp với số liệu đo tại nhà máy xử lý nước thải.

4.2. Kiểm nghiệm với kết quả tính toán của nhà máy xử lý nước thải tại Winsor, Ontario, Canada

Mô hình được kiểm nghiệm với bộ số liệu và của nhà máy xử lý nước thải tại Winsor, Ontario, Canada, kết quả tính toán theo mô hình có sai số dưới 10% so với kết quả tính toán của nghiên cứu trước đó.

4.3. Kiểm nghiệm với kết quả tính toán của nhà máy xử lý nước thải tại công ty cổ phần nhựa Hà Nội

4.3.1. Thông số dòng vào mô hình

Sau đây là bảng thông số của hệ thống xử lý nước thải:

Bảng 3.6: Thông số của hệ thống xử lý nước thải

Thông số	Đơn vị	Giá trị
$Q_{0,v}$	m ³ /ng	200,00
$S_{0,v}$	mg/l	125,00
$SS_{0,v}$	mg/l	45,00
SS_v	mg/l	40,00
SS_r	mg/l	9,18
N_v	mg/l	35,00
N_r	mg/l	8,00
Q_v	m ³ /ng	200,00
Q_x	m ³ /ngày	11,00
S_v	mg/l	120,00
S_r	mg/l	8,40
X_v	mg/l	20,00
X	mg/l	624,00
X_r	mg/l	7,80
X_T	mg/l	552,00
V	m ³	75,00
HRT	ngày	0,38
SRT	ngày	6,23

4.3.2. Hệ số động học của hệ thống xử lý

Hệ thống xử lý được nghiên cứu từ tháng 1/2015 đến tháng 12/2015. Khi hệ thống xử lý đi vào vận hành ổn định, tiến hành đo 10 mẫu với các thông số: S , X , S_0 , Q , V và tính toán các giá trị $\frac{HRT \cdot X}{S_0 - S}$; $\frac{1}{S}$ của các lần đo và biểu diễn lên đồ thị. Đường thẳng $y = a \cdot x + b$ cắt trục tung tại điểm nào thì đó chính là giá trị $\frac{1}{k}$, độ dốc đường thẳng $\tan \alpha = a = \frac{K_s}{k}$. Từ đó tính được giá trị K_s và k .

Đo các thông số: S , X , S_0 , Q , V , Q_r , X_r , Q_x , X_T và tính toán các giá trị $\frac{1}{SRT}$ và $\frac{S_0 - S}{HRT \cdot X}$ của các lần đo và biểu diễn lên đồ thị. Đường thẳng $y = a \cdot x + b$ cắt trục tung tại điểm nào thì đó chính là giá trị $-k_d$, độ dốc đường thẳng $\tan \alpha = a = Y$. Từ đó tính được giá trị k_d và Y .

Bảng 3.7. Giá trị xác định hệ số động học của hệ thống

TT	$S_0 - S$	$HRT \cdot X$	$1/S$	$HRT \cdot X / (S_0 - S)$	$(S_0/S) / HRT \cdot X$	$1/SRT$
1	120,00	212,40	0,1000	1,77	0,56	0,22
2	113,40	290,10	0,1515	2,56	0,39	0,13
3	117,70	256,22	0,1370	2,18	0,46	0,16
4	91,50	190,41	0,1176	2,08	0,48	0,17
5	100,00	205,13	0,1250	2,05	0,49	0,18
6	89,50	251,71	0,1818	2,81	0,36	0,11
7	129,50	271,68	0,1176	2,10	0,48	0,15
8	139,70	252,33	0,0971	1,81	0,55	0,17
9	100,60	203,17	0,1064	2,02	0,50	0,17
10	109,60	204,70	0,1064	1,87	0,54	0,21

Từ hai đồ thị đường thẳng $y = 15,3x + 0,24$ và $y = 0,5x - 0,07$, xác định được giá trị $K_s = 64,3$; $k = 4,2$; $Y = 0,5$ và $k_d = 0,07$

4.3.3. Kết quả tính toán

Bảng 3.8: Kết quả phát thải khí nhà kính tại hệ thống xử lý

Nguồn phát thải	Giá trị phát thải (kgCO _{2-tđ} /ngày)
Từ sản xuất điện năng phục vụ HTXLNT	
Tiêu thụ điện năng	34,363
Từ quá trình xử lý nước thải	
Quá trình hiếu khí	23,050
Phân hủy BOD dòng ra	1,709
Phát thải CO _{2-tđ} từ khí N ₂ O	7,666
Trường hợp thu hồi và đốt khí CH₄	
Phân hủy bùn yếm khí	24,716
Tổng phát thải từ quá trình xử lý	57,142
HSPT (kgCO _{2-tđ} /kgBOD)	2,34
Tổng cộng phát thải khí nhà kính từ hệ thống XLNT	91,505

Trường hợp phóng không khí CH₄	
Phân hủy bùn yếm khí	119,366
Tổng phát thải từ quá trình xử	151,792
HSPT (kgCO _{2-tđ} /kgBOD)	6,325
Tổng cộng phát thải khí nhà kính từ hệ thống XLNT	186,156

Kết quả mô hình cho thấy: trên toàn hệ thống xử lý, phát thải khí nhà kính ở quá trình xử lý chiếm ưu thế hơn so với phát thải khí nhà kính từ sản xuất điện năng. Phát thải khí nhà kính từ quá trình xử lý chiếm 62%. Phát thải khí nhà kính từ sản xuất điện năng chiếm 38%;

Trong quá trình xử lý, phát thải khí nhà kính tập trung chủ yếu ở bể xử lý sinh học và ở bể phân hủy bùn yếm khí. Khi thu hồi và đốt khí metan, lượng phát thải khí nhà kính ở bể phân hủy bùn yếm khí chiếm khoảng 43% còn ở bể sinh học chiếm hơn 43%. Lượng phát thải khí nhà kính ở nước thải dòng ra do phân hủy BOD còn sót lại chiếm tỉ lệ rất nhỏ, khoảng 3% ở. Lượng phát thải N₂O trong hệ thống xử lý không nhiều nhưng do khả năng gây ấm toàn cầu của N₂O gấp 296 lần khí CO₂ nên lượng khí nhà kính do nguồn này chiếm tỷ lệ cũng tương đối, khoảng 13%.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết lập được mô hình số phục vụ tính toán phát thải khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt; nghiên cứu đã thiết lập được các phương trình cân bằng cơ chất, phương trình cân bằng sinh khối trong các bể phản ứng, các hệ số động học, hệ số tỷ lượng của các chất tham gia phản ứng sinh hóa trong hệ thống xử lý; các phương trình thu được được giải số và được code số bằng ngôn ngữ lập trình Matlab.

Đã ứng dụng mô hình số vào tính toán phát thải khí nhà kính của hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt và đã đưa ra một số hệ số phát thải khí nhà kính, hệ số phát thải khí nhà kính hệ thống xử lý là 2,34 gCO_{2-tđ}/gBOD;

Mô hình đã mô phỏng sự ảnh hưởng của một số thông số đến khả năng phát thải khí nhà kính, từ đó có thể lựa chọn thông số vận hành thích hợp nhằm giảm thiểu phát thải khí nhà kính.

Ứng dụng mô hình giúp giảm nhân lực, giảm chi phí đầu tư và chi phí thực hiện các quá trình đo đạc, phân tích, tính toán khí nhà kính từ hệ thống xử lý nước thải sinh hoạt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. The 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006)
- [2]. Metcalf & Eddy, Inc. (2003) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. McGraw-Hill: New York;
- [3]. Bridle Consulting (2007). Development of a process model to predict GHG emissions from the water corporation metropolitan WWTPs
- [4]. Hochstein, L. I., and Tomlinson, G. A. (1988), "The enzymes associated with denitrification". Annual Review of Microbiology, 42, 231-261.
- [5]. C. M. Castro-Barros, M. R. J. Daelman, K. E. Mampaey, M. C. M. van Loosdrecht, and E. I. P. Volcke (2015), "Effect of aeration regime on N₂O emission from partial nitrification-anammox in a full-scale granular sludge reactor", Water Research, vol. 68, pp. 793-803
- [6]. Rittmann B.E., McCarty P.L. (2001), Environmental Biotechnology: Principles and Applications, McGraw-Hill Science/Engineering/Math
- [7]. Omid Ashrafi, Estimation of Greenhouse Gas Emissions in Wastewater Treatment Plant of Pulp & Paper Industry, June, 2012.
- [8]. Estimation of Greenhouse Gases Emissions from Biological Wastewater Treatment Plants at Windsor, University of Windsor, 2011.
- [9]. Bani Shahabadi M., Yerushalmi L., Haghghat F. (2010) Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants - Model development and application. Chemosphere 78:1085-1092.
- [10]. Kati Blomberg, Pascal Kosse, Anna Mikola, Anna Kuokkanen, Tommi Fred, Mari Heinonen, Michela Mulas, Manfred Lübken, Marc Wichern, and Riku Vahala. Development of an Extended ASM3 Model for Predicting the Nitrous Oxide Emissions in a Full-Scale Wastewater Treatment Plant. Environ. Scie. Technol. 2018, 52, 5803-5811.
- [11]. Lailai Huang, Hanxiang Li, Yong Li. Greenhouse gas accounting methodologies for wastewater treatment plants: A review. Journal of Cleaner Production 448 (2024) 141424.