

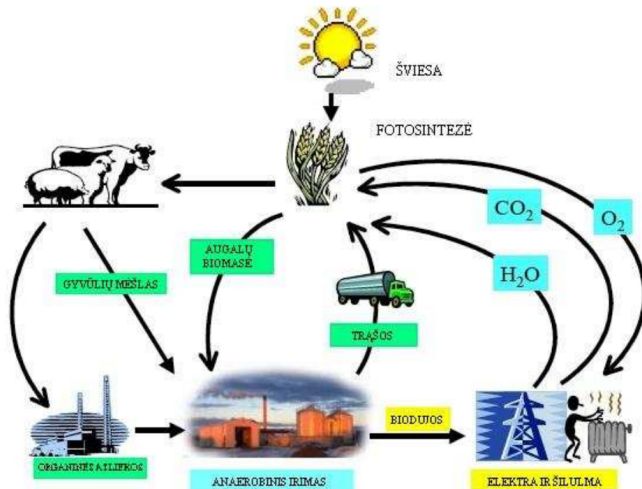
Temperatūrų pasiskirstymo bioreaktoriuje modeliavimas.

Andrej Bugajev, Olga Suboč

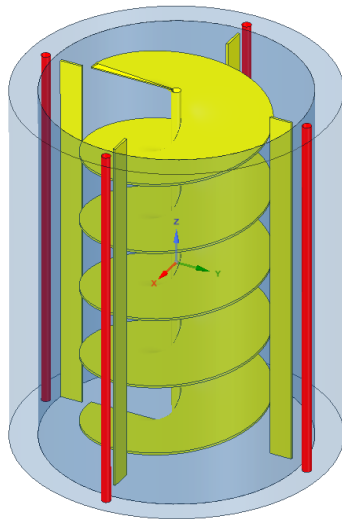
VG TU Matematinio modeliavimo katedra

Turinys

- 1 Uždavinio aprašymas
- 2 Bendros pastabos
- 3 Kelių atvejų modeliavimas
 - Pirmojo atvejo skaitinis modeliavimas: šildymas
 - Antrojo atvejo skaitinis modeliavimas: šildymas ir sraigto judėjimas
 - Trečiojo atvejo skaitinis modeliavimas: šildymas, sraigto ir sparnelių judėjimas.
- 4 Išvados



pav.: Biodujų gamyba



pav.: Bioreaktoriaus schema

Modeliavimo tikslas

– ištirti bioreaktoriaus temperatūros pasiskirstymą biomasėje prie skirtingų bioreaktoriaus maišyklės konfigūracijų atsižvelgiant į šiuos maišyklės komponentus: sraigtas, vertikaliosios mentės, nugrėbtuvas.

Uždaviniai:

- parinkti tinkamus modelius ir sudaryti diferencialinių lygčių sistemas, aprašančias skirtingus maišymo režimus priklausomai nuo maišyklės modifikacijos,
- parinkti programinę įrangą, tinkančią skaitiniam modeliavimui atlikti pagal sudarytus modelius,
- remiantis sudarytais teoriniais modeliais atlikti skaitinį modeliavimą su skirtingomis maišyklės konfigūracijomis,
- palyginti skirtingus maišyklės variantus temperatūros pasiskirstymo optimalumo atžvilgiu, t.y. vertinant temperatūros tolygumą.

Galimos maišyklės konfigūracijos

- 1 Biomazę šildo elektriniai kaitinimo elementai, mechaninio maišymo elementų ir nugrėbtuvo nėra;
- 2 Biomazę šildo elektriniai kaitinimo elementai, maišyklę sudaro cilindro viduje esantis sraigtas, nugrėbtuvo nėra;
- 3 Biomazę šildo elektriniai kaitinimo elementai, maišyklę sudaro cilindro viduje esantys sparneliai, nugrėbtuvo nėra;
- 4 Biomazę šildo elektriniai kaitinimo elementai, maišyklę sudaro cilindro viduje esantys sraigtas bei sparneliai, nugrėbtuvo nėra;
- 5 Biomazę šildo elektriniai kaitinimo elementai, maišyklę sudaro cilindro viduje esantys sraigtas bei sparneliai, yra plutos nugrėbtuvas.

$$\sigma^2(P) = \int_{x \in \Omega} (T(x, P) - \mu)^2 dx \rightarrow \min,$$

kur

$$\mu = \int_{x \in \Omega} T(x, P) dx / \int_{x \in \Omega} 1 dx,$$

čia:

$T(x, P)$ – substrato temperatūros funkcija nagrinėjamoje srityje;

μ – temperatūros vidurkis,

x – erdvinės koordinatės,

P – konstrukciją apibūdinančių parametrų aibė.

Alternatyvusis kriterijus

svarbu žinoti, kokia biomasės dalis tenkina palankios temperatūros intervalo sąlygą

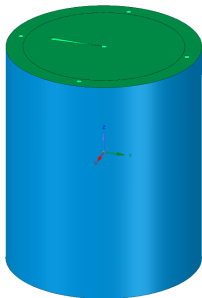
$$S(P) = 100\% \cdot \int_{x \in \Omega} s(T(x, P)) dx / \int_{x \in \Omega} 1 dx, \quad (1)$$

$$s(T) = \begin{cases} 1, & \text{kai } T \in [303.15, 308.15], \\ 0, & \text{kitur} \end{cases}$$

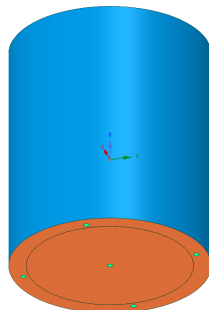
- 1 temperatūra prie palankios temperatūros intervalo kraštų gali turėti beveik vienodą poveikį dujų išskyrimo sąlygoms lyginant su temperatūra esančia intervalo viduryje;
- 2 jei temperatūra stipriai skiriasi nuo optimalios (arba leistinos) mezofilinio proceso temperatūros, jos neigiamas poveikis priklauso nuo procesų dinamikos, t.y. jeigu peršildytoje srityje bakterijos būna tik labai trumpą laiko intervalą – šios srities neigiamas poveikis bus mažas;
- 3 neigiamas temperatūros poveikis gali augti netiesiškai temperatūrai tolstant nuo optimalios – pavyzdžiui, stipriai peršildyta sritis gali mažinti bakterijų populiaciją net tuo atveju, jei ši sritis nėra didelė.

Pirmojo atvejo skaitinis modeliavimas: šildymas be maišymo.

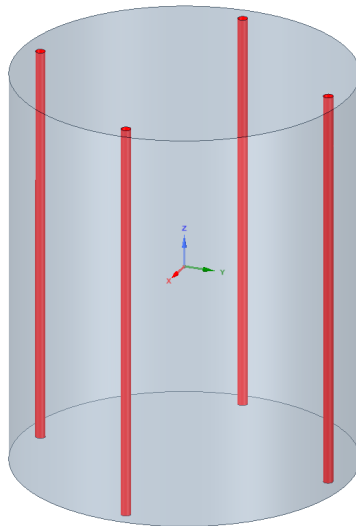
$\Omega_D = \Omega_p \cup \Omega_s \cup \Omega_b \cup \Omega_t$. Čia Ω_p – įkaitusių šildymo elementų paviršius, $\Omega_s, \Omega_b, \Omega_t$ – cilindro šonų, apačios ir viršaus paviršiai, atitinkamai.



pav.: Išorinis bioreaktoriaus vaizdas: vaizdas iš viršaus.



pav.: Išorinis bioreaktoriaus vaizdas: vaizdas iš apačios.



pav.: Bioreaktoriaus schema. Elektriniai kaitinimo elementai pažymėti

Tegul:

- t yra laikas, $x = (x_1, x_2, x_3)$ – erdvinės koordinatės, \vec{n} – paviršiaus normalė,
- $\vec{v} = (v_x(x); v_y(x); v_z(x))$ – masės judėjimo greitis, $p = p(x)$ – slėgis, $T = T(x, t)$ – temperatūra,
- ρ – medžiagos tankis, c – specifinė šiluma, λ – šilumos laidumo koeficientas, ν – klampis.

Šiame tyrime naudosime tokias biomasės parametrų

reikšmes: $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$, $c = 3890 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,

$\lambda = 0.58449 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $\nu = 0.0015 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$.

- Maišyklės šonai ir apačia yra ribojami plieno sienelių, kurios nepraleidžia masės, bet dalyvauja šilumos mainuose.
- Aplinkos temperatūra yra pastovi ir lygi 20° C.
- Biomą iš viršaus riboja išsiskiriančios dujos. Todėl šonų ir apačios sienelės laikysime neslidžiomis; iš viršaus laikysime, kad masę riboja slidus paviršius.
- Elektrinių kaitinimo elementų temperatūra yra pastovi.

Matematinis modelis

Masės judėjimo srautų šaltinių nėra: $\vec{v} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$,

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0, \\ T(x, 0) = T_0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \alpha(x) (\bar{T}(x) - T), \\ T(x, t) = T_p, \\ \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} t \in (0, t_{max}], x \in \Omega \setminus \Omega_D, \\ \text{kai } x \in \Omega \setminus \Omega_D, \\ \text{kai } x \in \Omega_s \cup \Omega_b \cup \Omega_t, \\ \text{kai } x \in \Omega_p, \\ \text{kai } x \in \Omega_w. \end{array} \quad (2)$$

Trečiojo tipo kraštinės sąlygos parametrai priklauso nuo paviršiaus:

$$\left(\alpha(x), \bar{T}(x)\right) = \begin{cases} (2, 302.15), & x \in \Omega_t, \\ (5, 293.15), & x \in \Omega_s, \\ (3, 293.15), & x \in \Omega_b. \end{cases}$$

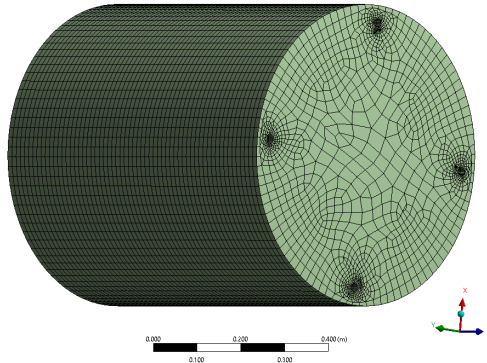
Įkaitusio šildymo elemento paviršiaus temperatūrą T_p parinksime taip, kad vidutinė modeliuojamos srities temperatūra tenkintų lygtį

$$T_{av.}(T_p) = \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{x \in \Omega} T(x, t, T_p) dx / \int_{x \in \Omega} 1 dx = 305.65 \pm 0.5, \quad (3)$$

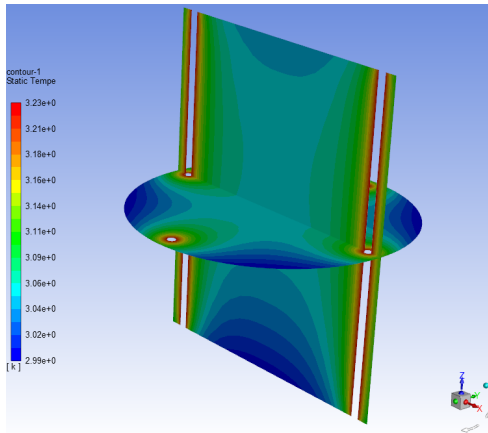
t.y. vidutinė nusistovėjusi temperatūra būtų artima vidutinei palankiai temperatūrai.

Imsimė $T_p = 323.15$, $T_{av.}(T_p) = 305.12$.

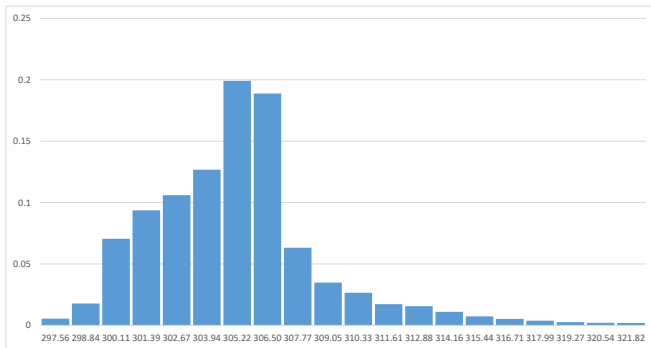
89100 elementų ir 94611 mazgų



pav.: Modeliuojamos srities diskretizavimas.



pav.: Temperatūros reikšmės pjūviuose.

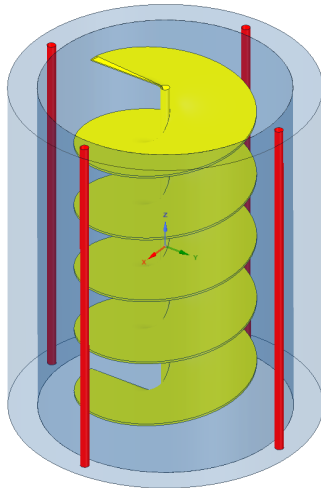


pav.: Temperatūros pasiskirstymo masėje histograma.

Į palankios temperatūros intervalą $t \in [303.15, 308.15]$ patenka tik 58.3% masės.

Antrojo atvejo skaitinis modeliavimas: šildymas ir sraigto judėjimas

$\Omega_D = \Omega_w \cup \Omega_p \cup \Omega_s \cup \Omega_b \cup \Omega_t$. Čia Ω_w – judančių detalių kraštų paviršius, Ω_p – įkaitusių šildymo elementų paviršius, $\Omega_s, \Omega_b, \Omega_t$ – cilindro šonų, apačios ir viršaus paviršiai, atitinkamai.



pav.: Bioreaktoriaus schema

- Šonai ir apačia $\Omega_s \cup \Omega_b$: yra sienelės, neleidžiančios masei judėti, t.y. $\vec{v} = 0$; temperatūra keičiasi dėl konvekcijos (šilumos mainai su išore) $\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \alpha(x) (\bar{T}(x) - T)$, čia $\bar{T}(x)$ yra išorės temperatūra, $\alpha(x)$ – šilumos perdavimo koeficientas.
- Viršus: \vec{v} tinka "slidžios" kraštinės sąlygos. Fluent terpėje, jos modeliuojamos kaip simetrinės kraštinės sąlygos
$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0, \mu \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{n}} \times \vec{n} = 0.$$
- Kaitinimo elementai: $T(x, t) = T_p$ ir neleidžia masei judėti į šildymo elementų vidų $\vec{v} = 0$.
- Judančios detalės: viduje šilumos mainai nevyksta, o paviršius nepraleidžia biomasės, $\vec{v} = 0, \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0$.

Užšaldyto sukimo metodas, kai modeliuojama tik atsižvelgiant į judėjimo proceso vieną momentą.

Judančių detalių sukimas yra aprašomas vektoriumi $\vec{\omega}(x)$, kurio kryptis sutampa su sukimosi ašimi, o ilgis lygus sukimosi greičiui ω (6 aps./min).

Tada reliatyvus judančios srities atžvilgiu greitis

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad (4)$$

kur \vec{r} yra taško pozicijos vektorius besisukančiose koordinatėse (kurių atskaitos taškas yra sukimosi ašyje).

Laikysime, kad besisukanti sritis yra visos srities cilindro formos dalis, į kurią patenka besisukančios konstrukcijos, bet nepatenka šildymo elementai:

$$|\omega(x_1, x_2, x_3)| = \begin{cases} 0.62832, & \text{kai } \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \leq [0.28], \\ 0, & \text{kitur,} \end{cases} \quad (5)$$

čia laikome, kad x_3 sutampa su sukimosi ašimi.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \nabla \cdot \vec{v}_r = 0, \\
 \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}_r \otimes \vec{v}) + \vec{\omega} \times \vec{v} \right) - \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{v}) = -\nabla p, \\
 c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}_r T) \right) + \nabla \cdot (p \vec{\omega} \times \vec{r}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \\
 \text{kai } t \in (0, t_{max}], x \in \Omega \setminus \Omega_D, \\
 T(x, 0) = T_0, \vec{v}(x, 0) = 0, \text{ kai } x \in \Omega \setminus \Omega_D, \\
 \vec{v} = 0, \text{ kai } x \in \Omega_b \cup \Omega_s \cup \Omega_p, \quad \vec{v} \cdot \vec{n} = 0, \mu \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{n}} \times \vec{n} = 0, \text{ kai } x \in \Omega_t, \\
 \vec{v}_r = 0, \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = 0, \text{ kai } x \in \Omega_w, \\
 \lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = \alpha(x) (\bar{T}(x) - T), \text{ kai } x \in \Omega_s \cup \Omega_b, T(x, t) = T_p, \text{ kai } x \in \Omega_p,
 \end{array} \right.$$

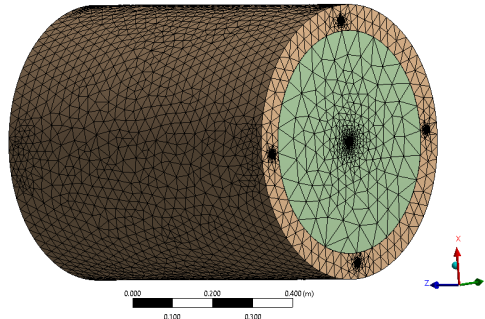
$$\left(\alpha(x), \bar{T}(x)\right) = \begin{cases} (2, 302.15), & x \in \Omega_t. \\ (5, 293.15), & x \in \Omega_s, \\ (3, 293.15), & x \in \Omega_b. \end{cases}$$

Laikysime, kad $T_0 = 308.15$ K, o
 T_p parinksime taip, kad

$$T_{av.}(T_p) = \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{x \in \Omega} T(x, t, T_p) dx / \int_{x \in \Omega} 1 dx = 305.65 \pm 0.5, \quad (6)$$

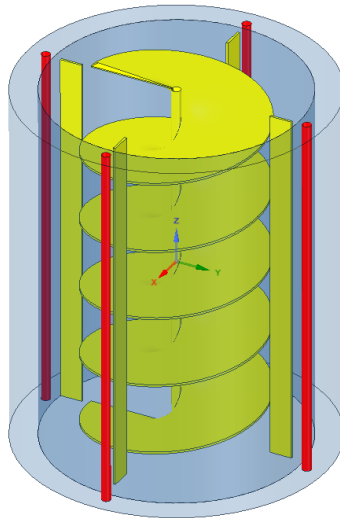
t.y. vidutinė nusistovėjusi temperatūra būtų artima vidutinei
palankiai temperatūrai.

515967 elementai ir 735368 mazgų. Mazgų skaičius padidėjo apie 7.8 kartų, o elementų – 5.45 kartų.



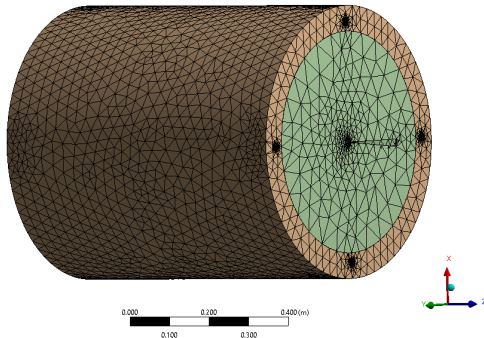
pav.: Modeliuojamos srities diskretizavimas.

Trečiojo atvejo skaitinis modeliavimas: šildymas, sraigto ir sparnelių judėjimas.

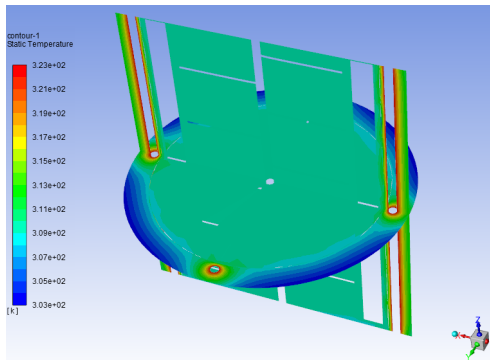


pav.: Bioreaktoriaus schema

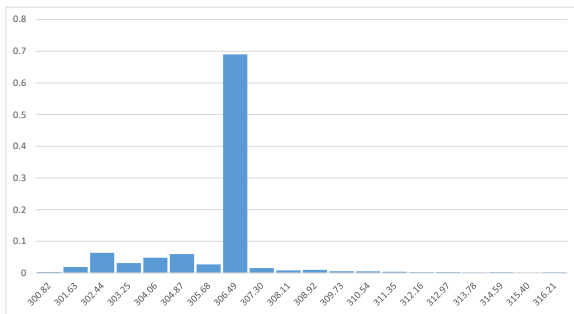
517207 elementai ir 737181 mazgas (buvo: 515967 ir 735368).



pav.: Modeliuojamos srities diskretizavimas.



pav.: Temperatūros reikšmės pjūviuose.



pav.: Temperatūros pasiskirstymo masėje histograma.

Kai $t \in [303.15, 308.15]$ – 86.8% masės

Išvados

- Nagrinėjamiems procesams aprašyti reikalinga Navjė-Stokso ir šilumos laidumo lygčių sistema, o sukimą galime modeliuoti naudodami užšaldytojo sukimo metodą, kadangi nagrinėjamam uždaviniui būdinga radialinė simetrija.
- Pasirinkta programinė įranga ANSYS, kurioje yra pilnas palaikymas visų išvardintų ankstesniame punkte modelių.
- Vien difuzijos proceso, kai konstrukcijoje nenaudojamos besisukančios detalės, neužtenka, kad užtikrinti temperatūros tolygumą – tik 58.3% masės patenka į palankios temperatūros intervalą.

Išvados

- Visų maišyklės elementų panaudojimas leidžia kokybiškai pagerinti temperatūros pasiskirstymą masėje – net 86.8% masės patenka į palankios temperatūros intervalą, o iš pasiskirstymo matome, kad nepatekusios masės didžioji dalis yra žemesnės temperatūros zonoje, kuri nėra tiek kenksminga kiek galėtų būti pernelyg didelė temperatūra.