

Osztófalas kolonnák tervezési lehetőségei

Design possibilities for dividing-wall columns

KIS Bendegúz, PhD hallgató, DR. HÉGELY László, egyetemi docens

Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Magyarország, H-1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3., +36-1-463-2633, bkis@edu.bme.hu, hegely.laszlo@gkp.bme.hu, <https://epget.bme.hu/>

Abstract

Dividing-wall columns (DWCs) offer significant savings in investment costs and energy demand for multicomponent distillation. DWCs are more complicated than traditional systems, and can't be modelled directly in commercially available process simulators, instead they can be modelled by breaking them down into simpler parts, multiple columns. There are several ways for breaking a dividing-wall down into several sections. The goal of this study is to examine the differences in models for dividing-wall columns based on the example of a semi-batch dividing-wall column configuration.

Keywords: semi-batch distillation, dividing-wall column, dynamic simulation, computer modelling

Kivonat

Az osztófalas kolonnák (DWC-k), többkomponensű elegyek desztillációjakor jelentős beruházási költség- és energiamegtakarítást tesznek lehetővé. A piacon elérhető folyamatszimulátorokban nincs lehetőség a DWC-k közvetlen szimulációjára, a modellezés úgy történhet, hogy egyszerűbb elemekre, több toronyból álló rendszerre bontják szét a berendezést. A részelemekre bontás több eltérő konfigurációban is lehetséges. A kutatás célja a különbségek vizsgálata az eltérő szimulációs modellek között egy félfolyamatos osztófalas kolonna példáján.

Kulcsszavak: félfolyamatos desztilláció, osztófalas kolonna, dinamikus szimuláció, számítógépes modellezés

1. BEVEZETÉS

Az Európai Unióban az ipari energiafelhasználás legnagyobb részéért a vegyipar felelős [1]. A desztilláció a folyadékelegyek szétválasztására leggyakrabban alkalmazott eljárás, ugyanakkor a folyamat fajlagos energiaigénye az egyik legnagyobb a vegyipari technológiák között. Az eljáráshoz felhasznált energia jelentős része fosszilis energiahordozókból, főként földgázból, származik. Az elterjedtség, nagy energiaigény és a felhasznált energiaforrások minősége azt jelenti, hogy a desztillációs eljárások környezetterhelése igen nagy [2].

Több módszer létezik a desztilláció energiaigényének csökkentésére. Egy lehetőség ezek közül, többkomponensű elegyek szétválasztásakor, az osztófalas kolonnák alkalmazása. Az osztófalas kolonna egy termikusan csatolt toronykonfiguráció megvalósítása egy héjon belül. A berendezés lényege, hogy a torony belső terét egy válaszfal függőlegesen felosztja, létrehozva egy betáplálási zónát és egy elvételi vagy termék zónát a fal két oldalán. A két oldalon lévő anyagok nem keverednek egymással, így eltérő folyamatok játszódhatnak le az egyes zónákban, segítve az elegy szétválasztását. Az osztófalas konfiguráció alapesetben a fal egyik oldalán érkező folyamatos betápláláson alapul, ezért döntőrészt folyamatos kolonnák esetében vizsgálták ezt az eljárási módot. A berendezésnek három típusa van, attól függően, hogy a függőleges osztófal hol helyezkedik el, és a berendezés milyen termikusan csatolt konfigurációnak feleltethető meg. Felső fal esetén: oldalrektifikálós kolonna, alsó fal esetén: oldalsztripperes kolonna és középső fal esetén: Petlyuk (vagy előfrakcionálós) kolonna. Az osztófalas kolonnák alkalmazása 25-30% megtakarítást is hozhat energiaigényben, továbbá, mivel két tornyos rendszerek kiváltásáról van szó egy ilyen berendezéssel, a beruházási költség is 20-30%-kal csökkenthető [2].

A félfolyamatos desztilláció speciális üzemeltetési politika egy szakaszos desztilláló berendezésre, ahol az üstbe a folyamat elején betöltött anyagon túl, részben folyamatos betáplálás is történik a torony egy pontjában [3]. A félfolyamatos desztilláció önmagában is alkalmas a folyamat energiaigényének csökkentésére.

Az energiaigény csökkentő és folyamatintenzifikáló eljárások vizsgálatának nehézsége, hogy a piacon elérhető folyamatszimulátorok nem rendelkeznek dedikált modulokkal az újszerű folyamatok és konfigurációk modellezésére. Így azokat a rendelkezésre álló, egyszerűbb elemekből, azok párhuzamosan és sorba kötésével, lehet felépíteni. Ezeket az összetett kapcsolásokat azonban többféleképpen is el lehet készíteni; ezért jogosan merülhet fel a kérdés, hogy melyik elrendezés lehet a legmegfelelőbb tervezéskor? Az irodalomban léteznek erre vonatkozó kutatások, ám ezek a folyamatos Petlyuk-konfigurációra fókuszálnak [4].

2. BEMENŐ ADATOK ÉS A VIZSGÁLT MODELLEK

2.1. A berendezés és műveleti adatok

A szétválasztandó elegy a következő három komponenset tartalmazza, illékonyság szerint csökkenő sorrendben: 33,33 mol% n-hexán (A), 33,33 mol% n-heptán (B), 33,34 mol% n-oktán (C). Az előírt tisztaság mindhárom komponensre 95 mol%.

A vizsgált kolonna atmoszférikus nyomáson üzemel. Az üst térfogat $V_{\text{üst}} = 9,5 \text{ m}^3$, az üstben megengedett maximális folyadékmennyiség $U_{\text{szarzs}} = 8 \text{ m}^3$. Az üstöt $\dot{Q} = 2872 \text{ MJ/h}$ állandó teljesítménnyel fűtjük. Az oszlop elméleti tányérszáma (üst és visszaforráló nélkül) $N = 30$, a folyamatos betáplálás forrponi hőmérsékleten, folyadék halmazállapotban $f = 18$ tányérra érkezik. A betáplálási-áram $F = 1 \text{ m}^3/\text{h}$. A kondenzátor hold-up $U_{\text{kond}} = 0,08 \text{ m}^3$, a hold-up a toronyban $U_{\text{torony}} = 0,08 \text{ m}^3$. Az osztófal magassága a legfelső 1. elméleti fokozattól lefelé számítva $H_w = 22$ tányér. A gőzelosztás 66,66% – 33,33% a betáplálási oldal javára. A szétválasztási művelet fő lépéseit, az alapestre vonatkozó időket és a folyamatra vonatkozó legfontosabb adatokat az 1. táblázat foglalja össze.

A dinamikus szimulációt ChemCAD professzionális folyamatszimulátor programmal végeztük. A szimuláció során alkalmazott gőz-folyadék egyensúlyi modell a Soave-Redlich-Kwong (SRK) állapotegyenlet volt.

Alapest lépései

1. táblázat

Lépés	Lépés kezdete (h)	Lépés vége (h)	Folyamatos betáplálás	Refluxarány Betáplálás oldal	Refluxarány Termék oldal	Üstmaradék a lépés végén
Felfűtés	0	0,37	Nincs	∞	∞	A, B, C
Szakaszos	0,37	1,73	Nincs	6,28	6,28	B, C
Félfolyamatos	1,73	3,90	Van	25,16	2	C

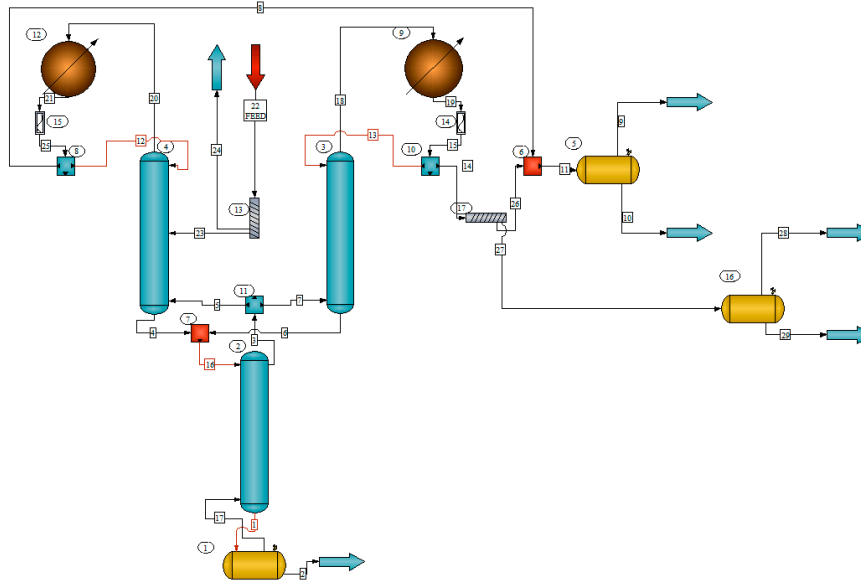
A szétválasztás három lépésből áll: felfűtés teljes refluxszal, a legkönnyebb komponens szakaszos gyártása, majd a középső forrponi és nehéz komponensek félfolyamatos gyártása a legkisebb illékonyságú összetevő további termelése mellett.

A félfolyamatos osztófalas kolonna egy sok szabadságfokú rendszer. Jelen vannak a hagyományos szakaszos kolonnára jellemző szabadsági fokok: elméleti tányérszám, sarzstérfogot az üstben, refluxarány, fűtési teljesítmény. Ezekon felül megjelennek újabbak, mint az osztófal hossza, az osztófal radiális helyzete, a gőzelosztási arány, a betáplálási tányér, a folyamatos betáplálás anyagáram mértéke és egy további refluxarány. Az alábbi paraméterek értékét rögzítettük: elméleti tányérszám, sarzstérfogot az üstben, fűtési teljesítmény, osztófal hossz és radiális helyzet, gőzelosztási arány, a betáplálási tányér és a folyamatos betáplált anyagáram. A szimulációkat elvégző számítógép adatai: AMD Ryzen 5 3500U with Radeon Vega Mobile Gfx 2,10 GHz processzor, 8,00 GB memória AMD Radeon Vega 8 Graphics (2 GB) videokártya. A szimulációk a

négy vizsgált modell esetében 3,6 s beállított lépésközzel futottak le. A szimuláció minden esetben akkor ért véget, amikor az üstmaradékban a legnehezebb komponens eléri a 95 % tisztaságot.

2.2. Modellek

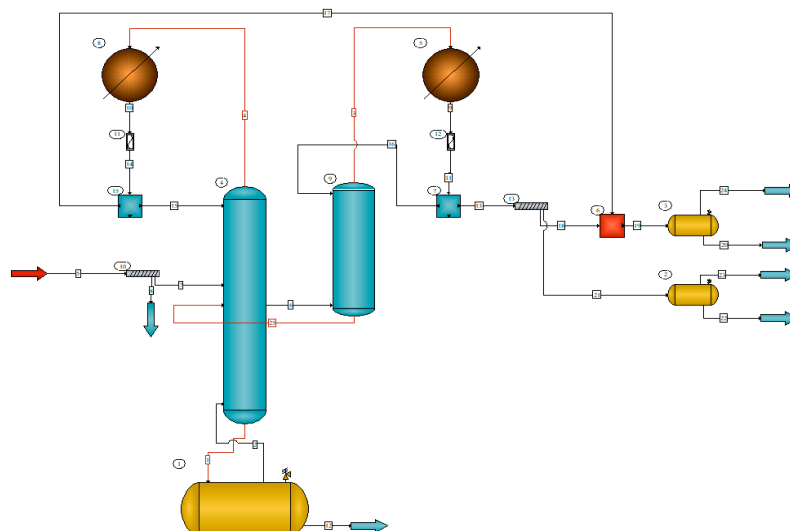
Négy különböző torony összeállítást hasonlítottunk össze. Korábbi munkánkban [5] a háromkolonnás összeállítást alkalmaztuk, ezt tekintjük az alapesetnek (DWC-3, 1. ábra).



1. ábra. Az alapeset: a háromkolonnás modell (DWC-3)

A kétkolonnás konfigurációk esetében van egy fő és egy oldalkolonna. Két összeállítást különböztettünk meg, attól függően, hogy az osztófal melyik oldalát tekintettük az oldalkolonnának és melyiket a fő kolonnának. Az első esetben a termék oldalon volt az oldalkolonna (DWC-2a, 2. ábra), a másik esetben a betáplálási oldal volt az oldalkolonna (DWC-2b, 3. ábra).

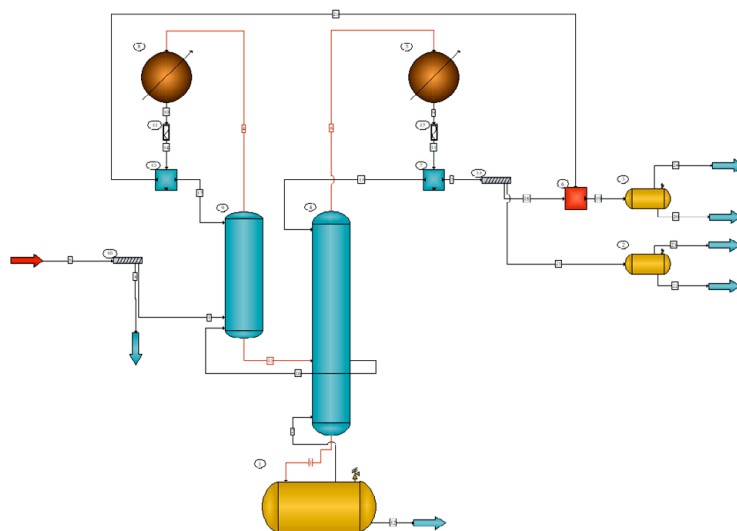
A tornyok számának növelésével újabb modell kapható. A 4. ábra mutatja be ennek egy példáját, a négykolonnás modellt (DWC-4). Itt egy-egy torony modellezte a betáplálás oldali betáplálási hely feletti szakaszt, a betáplálási hely alatti szakaszt, a termék oldalt és a fal alatti szakaszt.



2. ábra. Kétkolonnás modell, termékoldali oldalkolonna (DWC-2a)

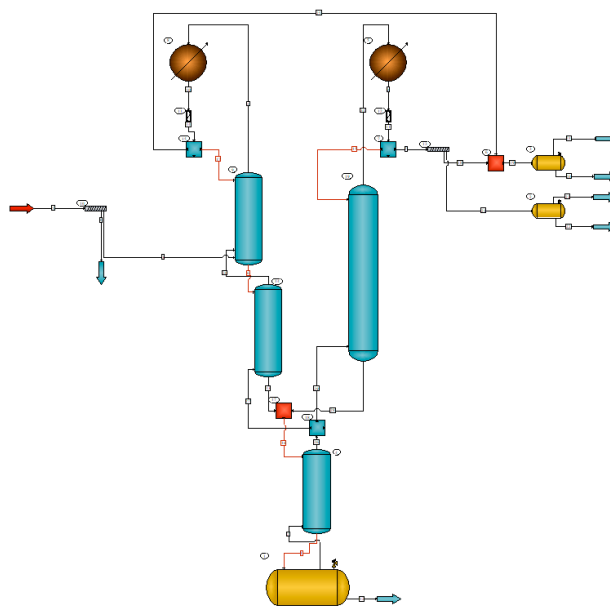
A tornyok modellezéséhez a CHEMCAD-ben az SCDS Column modult alkalmaztuk, a hőcserélőket Heat Exchanger, a szedőtartályokat és az üstöt a Dynamic Vessel modul modellezi. A betáplálás bekapcsolását

és a szedőtartályok közti átkapcsolást Dynamic Time Switch végzi. A refluxarányokat mindhárom esetben Divider, a refluxarányok közti váltást Ramp modulok, az egyes áramok egyesítését Mixer végzik.



3. ábra. Kétkolonnás modell, betáplálásoldali oldalkolonna (DWC-2b)

Osztófalás kolonnák szempontjából a modellek közötti legfontosabb különbség az üst felől érkező gőzárám elosztásának módja. A három- és négykolonnás esetekben ez egy Divider modulban megadható, míg a kétkolonnás esetekben ez a fő kolonnából történő oldalelvétel formájában valósítható meg.



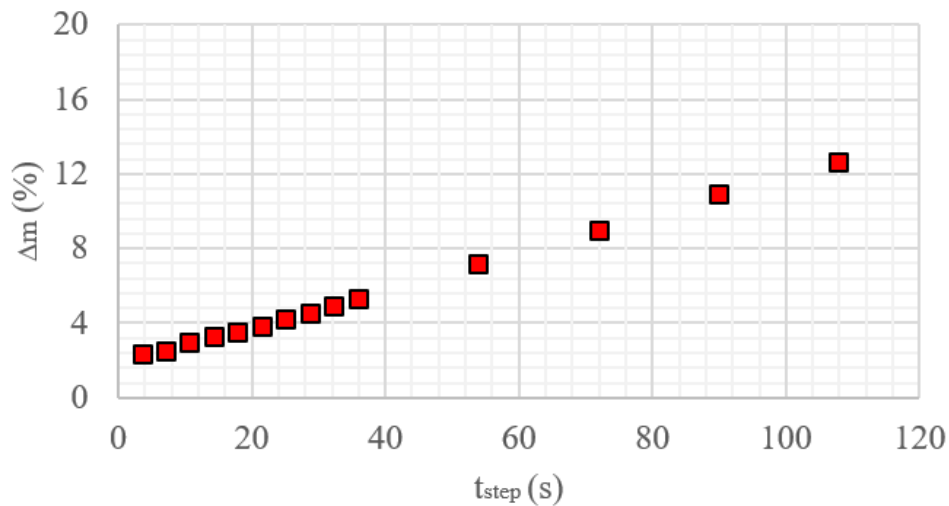
4. ábra. Négykolonnás modell (DWC-4)

3. EREDMÉNYEK

A vizsgált tényezők a teljes műveleti idő (t_{\max}), a betáplált és termékként megkapott folyadékmennyiségek különbségének aránya a betáplálthoz képest (Δm), a terméktisztaságok (x) és egy szimuláció lefutási ideje (t_{szim}).

3.1. Lépésköz megválasztásának hatása az alapesetben

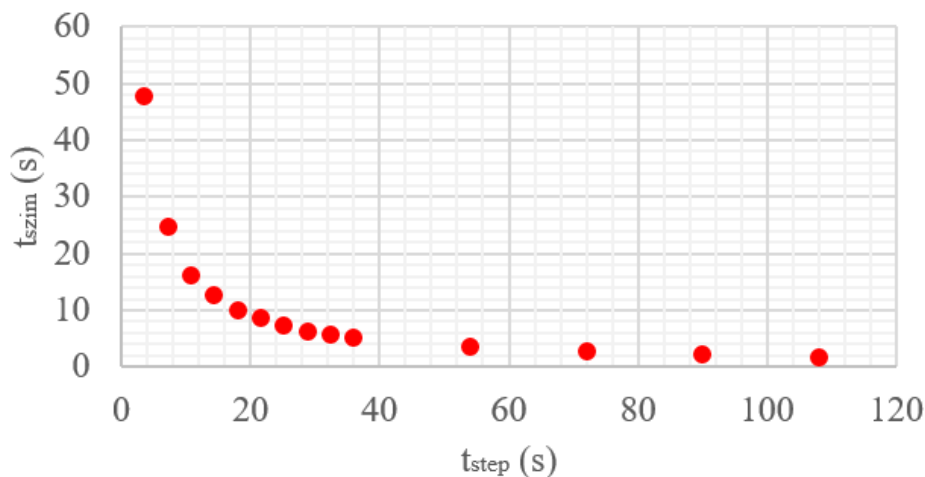
A teljes betáplált folyadékmennyiség és a folyamat végén a termékeként megkapott folyadékmennyiségek összegének relatív különbsége szigorúan monoton növekszik a lépésköz (t_{step}) növelésével (5. ábra), annak ellenére, hogy a kiindulási és műveleti paraméterek állandók. A be- és kilépő anyag különbsége nem lehet nulla, a megadott állandó folyadék hold-upok miatt.



5. ábra. Az elvesztett folyadékmennyiség aránya a betáplálthoz a lépésköz függvényében

Még a legkisebb vizsgált lépésköz esetében is nagyobb a különbség, mint a hold-upok mennyisége, még akkor is, ha figyelembe vesszük a dinamikus szimuláció végén a tartályokban található gőzmennyiségeket is.

A lépésközt addig csökkentettük, amíg az anyagmérleg hibája elfogadható nem lett. Ugyanakkor a lépésköz csökkentése jelentősen megnövelte a szimulációk futási idejét (6. ábra).



6. ábra. A szimulációs idő a lépésköz függvényében

3.2. Eltérő szimulációs modellek összehasonlítása

A négy konfigurációt vizsgálva azt tapasztaltuk, hogy összeállítástól függően szintén bekövetkezik változás az eredményekben, amit a 2. táblázat foglal össze.

A szétválasztási feladat minden esetben teljesült, az előírt tisztaságokat elértük. Az alapesethez képest az n-hexán desztillátum tisztasága minden más esetben nagyobb lett, míg az n-heptán esetében a DWC-2b esetben valamivel kisebb lett a tisztaság, a DWC-2a esetben és a DWC-4 esetben viszont itt is növekedés volt tapasztalható. Az üstmaradék n-oktán tisztasága minimális eltérést mutat csak a modellek között, mivel ennek elérése a leállási feltétel. Tisztaságok szempontjából az alapeset volt a legjobb, mivel azok közelítették meg leginkább az előírt értéket.

A teljes műveleti idő kis mértékben megnövekedett mindhárom alternatív esetben, a legnagyobb a DWC-2a esetében volt. A szimulációs idő összefüggést mutat a modell összetettségével: a kétkolonnás esetekben rövidebb, mint a három- és négykolonnás modelleknél. A be- és kilépő anyagmennyiségek közti különbség a DWC-2a esetben volt a legkisebb. A többi alternatív modell is jobban teljesített ebből a szempontból is.

Kolonna	DWC-2a	DWC-2b	DWC-3	DWC-4
x_{hex} (%)	95,44	95,58	95,25	96,79
x_{hept} (%)	95,32	95,11	95,13	95,21
x_{okt} (%)	95,00	95,01	95,00	95,01
t_{max} (h)	3,984	3,912	3,899	3,908
t_{szim} (s)	42,55	43,25	47,80	47,85
Δm (%)	2,02	2,12	2,32	2,19

Minden esetben teljesült a szétválasztási feladat, ebből a szempontból mindegyik modell megfelelt, viszont a DWC-2a esetében a legkisebb a t_{szim} szimulációs idő és a Δm különbség. Több száz szimuláció lefuttatásakor nem elhanyagolható időnyereséget jelenthet a DWC-2a modell alkalmazása.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a munkában osztófalas kolonnák modellezési lehetőségeit vizsgáltuk meg. Az összehasonlítást egy félfolyamatos osztófalas kolonna esetére végeztük, amely n-hexán, n-heptán, n-oktán ekvimoláris terner elegyet szétválasztására szolgál.

A szimulációk lépésközének változtatásával jelentősen változott a betáplált és termékként megkapott folyadékmennyiségek különbsége, az állandó értékű folyadék hold-upok ellenére. Ennél fogva CHEMCAD-ben készített osztófalas kolonnák dinamikus szimulációja esetén a lépésköz vizsgálata elengedhetetlen, azt olyan értékűre kell választani, amivel az anyagmérleg hibája elfogadható mértékűre csökkenthető, még ha ez növeli is a szimuláció idejét.

Mind a négy vizsgált modellel az előírt szétválasztási feladat teljesíthető volt. A legelőnyösebb a termékoldali oldalkolonnás, két tornyos modell volt, mivel itt volt a legkisebb az anyagmérleg hibája és a szimuláció ideje is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK-143059) pályázata és az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Eurostat. Final energy consumption in industry - detailed statistics: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics (Utolsó letöltés: 2026.02.23).
- [2] Kiss A. A., Smith R. Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry. Energy. Elsevier, 2020, 203, 117788.
- [3] Lang P., Hegely L. Different feeding policies for semi-batch distillation. Chemical Engineering Transactions. Italian Association of Chemical Engineering, 2018, 69, 439-444.
- [4] Nguyen T. D., Rouzineau D., Meyer M., Meyer X. Design and simulation of divided wall column: Experimental validation and sensitivity analysis. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. Elsevier, 2016, 104, 94-111.
- [5] Kis B., Hégyel L. Félfolyamatos osztófalas kolonna tervezése, in Barabás I. OGÉT 2025 - XXXIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2025, 277-282.