

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR

HŐCSERÉLŐ SZERKEZETEK OPTIMÁLIS TERVEZÉSE

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

Petrik Máté

okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET
TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

az MTA doktora

TÉMACSOPORT VEZETŐ:

Prof. Dr. Czibere Tibor

az MTA rendes tagja

TÉMAVEZETŐ:

Prof. Dr. Jármai Károly

egyetemi tanár

TÁRS-TÉMAVEZETŐ:

Dr. Szepesi L. Gábor

egyetemi docens

Miskolc, 2021.

Petrik Máté

HŐCSERÉLŐ SZERKEZETEK OPTIMÁLIS TERVEZÉSE

PhD értekezés tézisei

Miskolc, 2021

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

- elnök: **Prof. Dr. Bertóti Edgár**
DSc, egyetemi tanár (ME)
- titkár: **Dr. Szabó J. Ferenc**
PhD, egyetemi docens (ME)
- tagok: **Prof. Dr. Orbán Ferenc**
PhD, prof. emer. (PTE)
- Prof. Dr. Palotás Árpád**
DSc, egyetemi tanár (ME)
- Dr. Bihari Péter**
PhD, egyetemi docens (BME)

HIVATALOS BÍRÁLÓK

- Dr. Dúl Róbert**
PhD, managing director (Flow Computing Tech. Ltd.)
- Dr. Virág Zoltán**
PhD, egyetemi docens (ME)

1 Kutatási feladat

1.1 Bevezetés

A hőcserélő szerkezetek nélkül a mai modern életszínvonalunk gyakorlatilag nem lenne fenntartható, mivel az élet minden területén, sokszor akár láthatatlanul is jelen vannak. Gondolhatunk ilyenkor a vezetékekben folyó elektromos áramra (az erőművekben található forralók), a használati berendezéseinkre, mint például elektromos készülékek burkolatára, bútorok kárpitjára, párnázatokra, csomagolóanyagokra (vegyipari üzemekben található technológiai hőcserélők), lakásaink fűtő- és hűtőberendezéseire (radiátorok, légkondicionálók), feldolgozott élelmiszereinkre (szárított, sűrített élelmiszerek, alkoholos italok) vagy akár a közlekedésre (gépjárművek motorját hűtő hőcserélők) is. A felsorolás kiegészíthető azokkal a berendezésekkel, amelyek az egyébként hulladékként keletkező energiák felhasználására szolgálnak, növelve a fogyasztók energetikai hatékonyságát.

Az adott feladat ellátását szolgáló hőcserélő berendezés kiválasztására nincsenek szigorú szabályok, gyakorlatilag mindent a külső körülmények fognak befolyásolni. Elengedhetetlen a rendszerben való gondolkodás, mert a legtöbb esetben nem önmagukban fognak működni. Egy technológiába épített több berendezés esetén a közeg tömegáramát állandónak kell tekinteni, ehhez szükséges a geometriai méreteket meghatározni.

A berendezések méretezésére vonatkozóan azonban nem szabad megállni pusztán a hőtechnikai viszonyok vizsgálatánál. A berendezések megépítésénél és az alátámasztó szerkezet tervezésénél a legfontosabb paraméter a készülék tömege. A berendezések köpenye nem fog részt venni a hőcserében, hőtechnikai szempontból irreleváns adat, nyomástartó szempontból viszont ez lesz a legfontosabb geometriai jellemző. Ez a falvastagság a kazánformulával határozható meg, mely szerint az átmérővel és a nyomással egyenes, az acél mechanikai tulajdonságaival fordított arányosságban van. Kis nyomások és átmérok esetén akár rendkívül kis falvastagságok is adódhatnak, viszont a gyakorlatban 6 mm-nél kisebb lemezből nem szokás nyomástartó berendezést készíteni. Az optimalás elvégzése során ez egy szigorú feltétel lesz, jelentősen befolyásolja majd az optimális méreteket.

Az optimalás során az előzőhöz hasonlóan több olyan geometriai korlátot kell használni, melyek az üzemeltetéssel és megépítéssel kapcsolatosak. Néhány példa ezekre:

- A bordáscsöves hőcserélők egy részét leszámítva mindegyik hengersizmetrikus konstrukció. Ebből a szempontból nem célszerű készíteni rövid, nagy átmérőjű berendezéseket, a hosszúság/átmérő arányuk (L/D) 1-1,5-nél legyen nagyobb. Nagyobb átmérőnél nagyobb lesz a falvastagság; nagyobb lesz az áramlási keresztmetszet, ami hatására csökken az áramlási sebesség, ezzel arányosan csökken a hőátadási tényező. Megnö a csökötegfal tömege, és sokkal több cső hegesztését kell elvégezni. A hengerlés következtében lehet, hogy több axiális irányú varratot kell kiképezni, melyek a készülék szempontjából a legveszélyesebbek.
- A túlságosan karcsú készülékek tervezését is kerülni kell. Szilárdsági szempontból sokkal kedvezőbbek lehetnek (például a köpeny készíthető varratmentes cső alapanyagból, így elkerülve a hegesztés alkalmazását), viszont alátámasztási szempontból problémásabbak. Ha két nyereggel vannak alátámasztva, behorpadhatnak az önsúly és töltetsúly következtében, amit több nyereggel elkerülhetünk, de akkor számolnunk kell ezeknek a plusz költségével. Áramlás- és hőtechnikai

szempontból is hátrányos a használatuk. A kis átmérő miatt kicsi lesz az áramlási keresztmetszet, így megnő az áramlási sebesség. Ez egy bizonyos értékig növeli a hőátadási tényező nagyságát, viszont jelentősen lecsökkenti a tartózkodási időt. A kis keresztmetszetbe kevés számú csövet tudunk elhelyezni, a hőátadó felület nyomelésére egyetlen módunk a hossz növelése. Ezek együttesen rendkívül nagy nyomásesést fognak létrehozni, mely az üzemeltetési költségeket fogja megnövelni.

- A nem megfelelő szerkezet megválasztása üzemeltetési és karbantartási problémákat okozhat.

Nem szabad megfeledkezni a hőtechnikai számításoknál az anyagjellemzők hőmérsékletfüggéséről sem. Hajtóerő szempontjából egy olyan hőcserélő, melyben a meleg közeg hőmérséklete 80°C -ról 60°C -ra csökken, miközben a hideg közeg 30°C -ról 40°C -ra melegszik nem különbözik attól, amelyben 60°C -ról 40°C -ra hűl, míg a másik 10°C -ról 20°C -ra változik, ha ellenáramot feltételezünk. Azonban a hőtechnikai számításokhoz szükséges anyagjellemzők a közegek közepes hőmérsékletén változnak, így a hőátviteli tényezőt kis mértékben befolyásolni lehet. Ezen hőmérséklet értékeknek az optimalása azonban nem célszerű. Ahogy említettem, ezek a hőcserélők rendszerben üzemelnek, a segédenergiákat más üzemszervekből kapják. Ha ilyen szempontok alapján optimalnánk a berendezés üzemi paramétereit, akkor nagy valószínűséggel az optimális hőmérséklet eléréséhez egy másik hőcserélőt kellene beépíteni, ami jelentősen megnövelné a költségeket.

Az informatikai háttérnek köszönhetően manapság elengedhetetlen a véges térfogatok módszerének (CFD, az angol Computational Fluid Dynamics rövidítéséből) használata a folyamatok vizsgálata során, melyek eredményeit a fizikai folyamatok méréséből származó eredményekkel hasonlítunk össze. A modellezés meggyorsítja és gazdaságossá teszi az innovatív tervezés és optimalás folyamatát. Egy próbatesten végzett mérések a vizsgált eszköz valós viselkedését reprezentálják. A mért eredmények és egy valóságot tükröző geometriai modell segítségével meghatározhatók a CFD szimuláció paramétereit (elemméret, peremfeltételek, alkalmazott turbulencia-modell, a hálósűrítés pozíciói), mely eredményeket kezelhetünk valós eredményekként.

1.2 Célkritikázések

A bevezetésben leírtak alapján látható, hogy egy rosszul kiválasztott berendezés, rosszul meghatározott geometria a felhasználó számára gazdaságtalan működtetést eredményezhet. Kutatásaim során a berendezések kiválasztási procedúráját, a kialakuló hőátadási viszonyoknak a legpontosabb számítási modelljének meghatározását tűztem ki célul.

1. Cső a csőben, csőköteges és bordáscsöves hőcserélő konstrukciók esetén optimalási eljárást kidolgozni, amelyek a legkisebb üzemelési és anyagköltséggel rendelkeznek, de a tervezett hőteljesítmény leadására alkalmasak.
2. Bordáscsöves hőcserélő típusok esetén tapasztalati Nu-szám összefüggést meghatározni, mely összefüggésekkel a specifikusan vizsgált típusra pontosabban alkalmazhatók, a mért eredményekkel összhangban vannak.
3. A nagyméretű berendezések alátámasztására szolgáló acélszerkezeti elemek optimalis méretezése, valamint az optimalt eredmények összehasonlítása különböző tervezési előírások alapján.

2 Vizsgálati módszerek

2.1 Optimálási célfüggvény meghatározása

A hőcserélők optimalálásán érthetjük a berendezés egy elemének az optimalását, a teljes szerkezet optimalását valamilyen szempont szerint, valamint a teljes üzem optimalását is. A szakirodalomban arányaiban a legtöbb kutatás az első esetre, vagyis egy-egy szerkezeti elem vizsgálatára irányul. Ez cső és csőben és csőköteges hőcserélő típusok esetén a köpenyoldalon elhelyezett turbulencia-fokozó tárcsák és terelőlemezek, bordáscsöves hőcserélők esetén pedig különböző méretű, alakú és osztású bordákat jelent.

Kutatásaimban én a második szinttel, vagyis a teljes szerkezet optimalási lehetőségeivel foglalkoztam. Céloom olyan költségfüggvény matematikai megfogalmazása volt, mely figyelembe veszi a berendezés gyártási és üzemelési költségeit. A gyártási költségek a berendezés szerkezeti anyagának, vágásának, élőkészítésének, hegesztésének költségeiből adódik össze, míg az üzemi költségek a karbantartási költségek, szükséges szivattyú teljesítményekből állnak.

A számítások során a kulcskérdést az anyagköltség és üzemelési költség közötti súlyfaktor jelenti. Ennek a tényezőnek a meghatározása a berendezés tervezett élettartamától, a rendszerben betöltött szerepétől, a benne áramló közegek fizikai tulajdonságaitól függ. A berendezések teljesítménye egyenesen arányos a hőátadó felülettel és hőátadási tényezővel. Az optimalálás során ez a hőteljesítmény kezdeti feltétel lesz, melyhez a legkisebb költséget szeretnénk társítani. A hőátviteli tényező növelésének egy lehetséges módja az, ha növeljük a közegsebességet. Ennek következtében a hőátadó felület csökkenthető, ami kisebb gyártási költségeket fog jelenteni. Ezzel szemben ez a nagyobb közegsebesség nagyobb nyomásvesztéséget és kopást, több karbantartást fog eredményezni, mely az üzemeltetési költségek növekedését fogja eredményezni. Az optimalási eljárás ezeket a tényezőket mind figyelembe veszi [1, 2].

Kutatásaim során elengedhetetlen volt, hogy a különböző turbulencia-fokozó eszközök hatását vizsgáljam, melyek összefoglalását a disszertációm tartalmazza. Ezen vizsgálatok esetén nem vizsgáltam a szakirodalmi adatok pontosságát, hanem az algoritmus felépítéséhez használtam paraméterként.

A megalkotott összefüggések olyan optimalási algoritmusokban használtam fel, melyeket a gyakorló tervező mérnökök is alkalmazhatnak a munkájuk során. Ezek a módszerek az általánosított redukált gradiens módszere [3], valamint a belső büntetőfüggvényes eljárás módszere [4] és [5] voltak. A felépített összefüggésekkel bizonyítottam, hogy megalkothatók úgy az összefüggések, hogy ezek megoldást adjanak.

2.2 Numerikus szimulációk

Kutatásaim során a hőátadási műveleteket három aspektusból vizsgáltam: kísérleti, numerikus szimulációs és analitikai számításos szemszögből. Minden esetben, amikor lehetőségem volt rá, kísérleteket végeztem a valós berendezéseken, amihez olyan numerikus modellt építettem fel, hogy a kétféle módon kapott eredmények közel ugyanazt az eredményt hozzák, majd megvizsgáltam a szakirodalomban található összefüggésekkel kapott eredményeket. Amennyiben ez a modell nem adott az előzőkhez hasonló eredményt, módosítottam az összefüggésekben található konstans-tényezőket, hogy az adott feladathoz egy jobb számítási modellt építsek fel, amit az optimalálás során felhasználhatok [6].

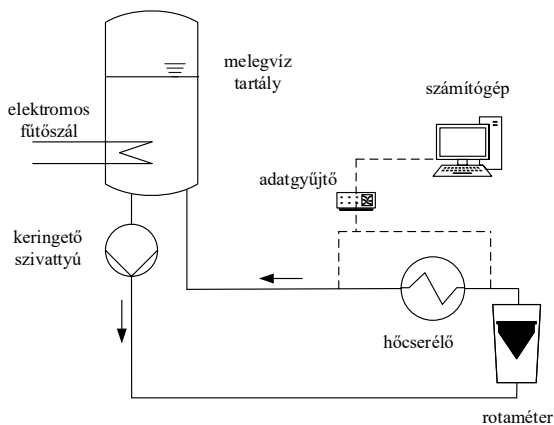
Felületi hőcserélők esetén két jellemző vizsgálat a megszokott: az áramló fluidumok

és a fal közötti hőátadási tényező valamint a szerkezet ellenállásának (nyomásesésének) a meghatározása. Ez a megállapítás az esetünkben nem elegendő az alkalmazott turbulencia modellre nézve, mert mást kell alkalmazni egy folyadék-folyadék típusú csöves hőcserélő esetén, mint egy gáz-folyadék típusú bordáscsöves hőcserélő esetén [7, 8].

Kutatásaim során két numerikus szimulációk elvégzésére alkalmas programmal, az ANSYS szoftvercsaláddal és az SC-Tetrával végeztem vizsgálatokat. Bordáscsöves hőcserélőkkel kapcsolatban kétféle modellezési technikát is alkalmaztam. Az egyik technikával minden egyes bordát és a köztük lévő levegő térfogatokat egyesével modelleztem, melyhez nagyméretű háló tartozott, valamint az egész rendszert egyetlen porózus térfogatként vizsgáltam. Ennek előnye a sokkal kisebb hálóméret, illetve grafikus felülettel nem rendelkező CFD programokkal is egyszerűen kezelhető. A kutatásaim célja ez a fajta modellezési technika alkalmazása a rácsos bordás hőcserélőknél, melyek rendkívül sok bordával, és nagyon kis bordatávolságokkal rendelkeznek. Az eredményeim alapján nem alkalmazható ez az egyszerűsítő technika.

2.3 Bordáscsöves hőcserélők kísérleti vizsgálata

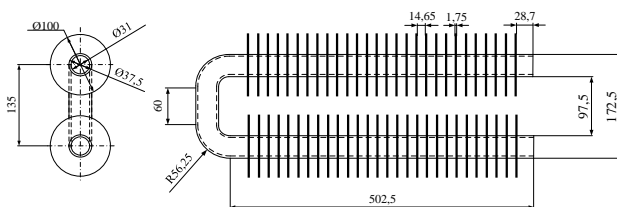
A mérések elvégzéséhez kísérleti berendezést építettünk, amit a 1. ábrán tüntettem fel. A bordáscsöves hőcserélőket leggyakrabban folyadék és gáz fázisú közegek közötti hőcserélőként alkalmazzák, a mérések során ezt valósítottam meg én is: a gáz fázis környezeti nyomású levegő volt, a folyadék pedig víz. A hőcserélő csöveiben meleg vizet áramoltattunk, melyet egy háztartási bojler segítségével állítottunk elő. Ehhez egy háztartási bojler használtam, amit leszigeteltünk. A bojler perselyébe egy Pt100 típusú hőelemet helyeztünk, amit egy szabályozóhoz csatlakoztattunk. Ezzel a körrel állítottuk be a meleg víz hőmérsékletét. A rendszert nyomás alá helyeztük annak érdekében, hogy a keringető szivattyúval áramoltatni tudjuk. A számítások elvégzéséhez szükséges adat ennek a keringtetett víznek a mennyisége. Ezt egy vízre kalibrált rotaméterrel olvastam le.



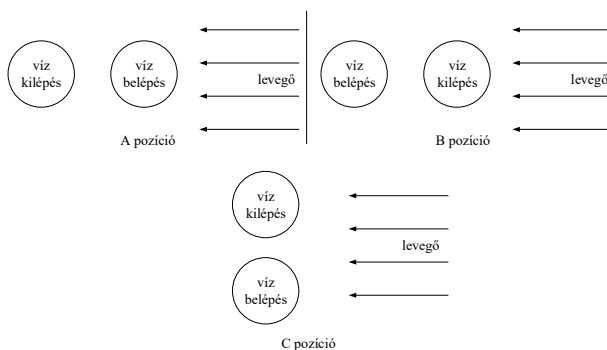
1. ábra. A vizsgálatokhoz épített mérőáramkör

Közvetlenül a hőcserélőbe történő belépés előtt és kilépés után K típusú hőelemekhez való tömszelencét helyeztünk el a víz hőmérsékleteinek méréséhez. Ezek a hőelemek egy Quantum X MX1609 típusú adatgyűjtőhöz csatlakoztak, az adatok feldolgozását pedig catman@Easy szoftverrel végeztem el. A mintavétel másodpercenként történt (1 Hz), és a mérések alkalmával minden esetben megvártam a stacionárius állapot kialakulását. A mért adatokból az utolsó két percet vettem figyelembe, így mindig 120 mért érték számtani közepével számoltam a műveletani értékeket, valamint az anyagjellemzőket is ezeken a hőmérsékleteken vettem figyelembe, az A mellékletben szereplő polinomfüggvények alkalmazásával (ezekhez a közelítő összefüggésekhez a UniSim Design (Honeywell International Inc.) szoftver adatbázisát használtam fel).

A berendezés úgy lett kialakítva, hogy többféle hőcserélő mérésére alkalmas legyen. A számítógépen és adatgyűjtőn kívül mindent egy állványon rögzítettünk, amely emelőszerkezet segítségével mozgatható. Két különböző kialakítású bordáscsőves hőcserélővel végeztem kísérleteket: egy U-alakú csövön lévő kör alakú bordákkal felület növelt hőcserélőn (2. ábra) és egy autóhűtő radiátoron. Előbbi esetén a berendezést az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet laboratóriumában lévő szélcsatornában helyeztem el, mely a külső légáramlást biztosította. Utóbbi esetén pedig a radiátort, mint komplett egységet vizsgáltam, melyen található volt két különböző átmérőjű ventilátor.



2. ábra. A körbordával szerelt hajtűcső



3. ábra. A körbordával szerelt hajtűcső

Bordáscsőves hőcserélők esetében a klasszikus elmélet szerint ([9]) minden berendezés keresztáramúnak számít, mivel a levegő a bordákra, és így a csövekre is mérőleges irányban áramlik. A mérések kiértékelése után, a szakirodalomban található összefüggésekkel a számított eredmények nagy eltérést adtak a mért adatokra. Ennek következtében a 3. ábrán látható elrendezéseket más-más hőmérséklet-különbségekkel határoztam meg.

Az A pozíciót kvázi-egyenáramnak, a B-pozíciót pedig kvázi-ellenáramnak neveztem el, melyekhez az elnevezésnek megfelelően határoztam meg a ΔT_{LOG} értékét, melyekhez új tapasztalati Nu szám összefüggést határoztam meg. A C-pozíció esetében valódi keresztáramlást feltételeztem, melynél az ellenáramláshoz tartozó hőmérséklet-különbséggel határoztam meg a hajtóerőt, de egy másik tapasztalati összefüggést alkotam.

2.4 Acélszerkezet optimalálása

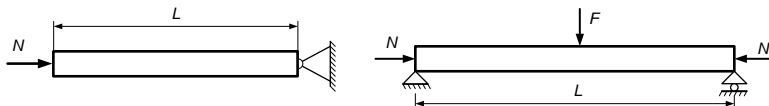
A dissztációmban eddig bemutatott vizsgálatok a hőcserélő szerkezet belsejében kialakuló konvektív hőátadást mutatták be, a szilárdságtani problémákkal csak érintőlegesen foglalkoztak. Ahogy többször is írtam, ezeket a berendezéseket nagyon ritka esetekben használják önállóan, szinte minden esetben rendszer-szemléletben kell gondolkozunk. Ez azt jelenti, hogy egy adott acélszerkezeten több berendezés is helyet kap (természetesen itt már nem csak hőcserélők, hanem más berendezések is szóba kerülhetnek, például edények, szűrők, centrifugák, kompresszorok), vagyis az acélszerkezetet is úgy kell megterveznünk, hogy az adott terheléseket elviselje.

Az acélszerkezetek minden gyár, üzem alapvető részét képezik, gyakorlatilag azok csontvázát jelentik. A beruházás során, az építkezés kezdetén nagyon erőforrás igényes ennek a szerkezetnek a beépítése. Az üzemhez készített tervek során gyakorlatilag már egy optimalizálási folyamat zajlik; elvi korlátja nem lenne annak, hogy ezeket az üzemeket jelentősebb acélszerkezet nélkül, horizontális építési móddal építsék meg, valamint annak sem, hogy nagyon magas épületekben történjen a termelés. A horizontális építési módnak a hátrányai közé tartozik az, hogy nagyon nagy területre lenne szükség, ami a mezőgazdasági területek méretének csökkenését okozná, valamint a közegek áramlását nem tudnánk gravitációs módon megvalósítani, így sokkal több szivattyúra lenne szükség, amely az üzem energiafogyasztását növelné meg túlságosan (ami folyamatos kiadást jelent). A magas vázszerkezeteknél viszont túlságosan nagy szelvénykeresztmetszetekre lenne szükség, egyrészt a szerkezet öntömegének következtében, másrészt a rajta elhelyezett készülékek tömege miatt. Egyik szélsőséges esetben sem elhanyagolható a kezelő-személyzet beavatkozásának ideje sem, mely egyik esetben sem ideális.

Önálló példa esetén is van jelentősége, gondoljunk például egy klímarendszer külső egységére. Már kisebb üzemek esetén is a számítógépszoba jelentős hűtést igényel, melyhez nagy teljesítményű hűtőberendezés és nagy felületű bordás hőcserélő tartozik. Ezeket általában vagy a szerverterem, vagy a vezérlőépület tetején szokták elhelyezni. Nagy tömegű berendezések esetén az épület szerkezetében kell nagy keresztmetszetű szelvényeket beépíteni. Ebbe a tömegbe a készülék teljes tömegét bele kell számítani, vagyis az acélszerkezet, a töltet, a szigetelés, a szelvények és minden hozzá tartozó egyéb tartozék tömegét bele kell számítani [10].

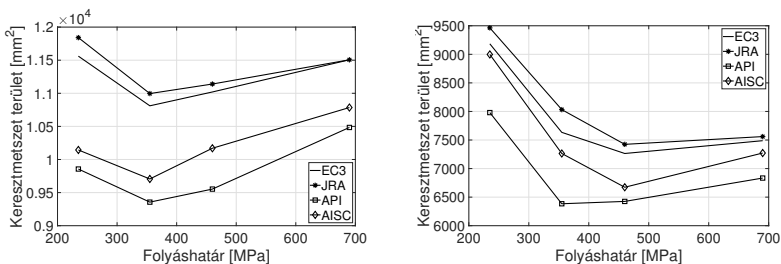
Gyártástechnológiai és a csatlakozási pontok kialakításának szempontjából a legjobb választás az I- és szerkenyszelvények lehetnek. A méretezési/optimalási eljárás során többféle acélminőséget többféle szabványi előírás alapján [11, 12, 13, 14] hasonlítottam össze. Minden esetben a célfüggvényem a keresztmetszet minimum volt, mely-

ből következnek a tömegminimum és költségminimum is. A felsoroltak mellett ezeket a minimális keresztmetszeteket az adott mechanikai modellben több szelvényhosszra és terhelésre is vizsgáltam. A nagy számú számítás miatt az optimalizáló eljárást automatizáltam, így egy gyakorló mérnök számára is alkalmazható eljárást hozva létre [15], [16]. A 4. ábrán az általam vizsgált nyomott, illetve hajlított-nyomott rúd mechanikai modellje látható.



4. ábra. A vizsgált gerendák mechanikai modellje

Nyomott I-szelvények és szekrénszelvények optimalálásának elvégzése és az eredmények kiértékelése után azt a következtetést tudtam levonni, hogy nyomott szelvények esetén az optimális keresztmetszet területek nem a legnagyobb szilárdságú acélhoz tartoznak, valamint azt is, hogy a szelvény típusától függően más acélminőség fogja a legkisebb értékeket adni.



5. ábra. Optimális keresztmetszet területek a folyáshatár függvényében

3 Új tudományos eredmények

T1. Cső a csőben hőcserélők tekintetében megalkottam egy optimalisasi célfüggvényt, mely a berendezések két legfontosabb költségét, az anyagköltséget és az üzemeltetési költséget tartalmazza. Az optimalisasi célfüggvény mellett megalkottam azokat a méretezési feltételeket, melyek mellett a berendezés biztonságosan üzemeltethető. Kimutattam, hogy ezeket a matematikai összefüggéseket felhasználva, általánosan alkalmazható matematikai szoftverek segítségével az optimalisasi feladat elvégezhető.

A tézishez tartozó publikációk: (8) (9)

T2. Csőköteges hőcserélők esetében szimulációs technikát alkalmazva bemutattam, hogy a köpenytérben lévő terelőlemezek minden esetben növelik a köpenyoldalon kialakuló hőátadási tényező értékét a terelőlemez nélküli esethez képest. Kimutattam, hogy többcélű optimálás esetén a hőtechnikai optimum pont nem esik egybe a költség optimumával.

Az optimalisasi elvégzéséhez szükséges adat az adott köpenytérben elhelyezhető csövek száma, melyre matematikailag pontos eljárást fejlesztettem ki, mivel a csőszám jelentős hatást gyakorol mind a célfüggvényre, mind pedig a feltételek függvényekre.

A tézishez tartozó publikációk: (2) (10) (16) (17).

T3. Bordáscsőves hőcserélők hőátadási viszonyait mérésrel és szimulációval vizsgálva bemutattam, hogy a szakirodalomban található összefüggések alkalmazásával a berendezés hőteljesítményére vonatkozólag nagy eltéréseket tapasztalunk. A mérési eredményekből kvázi-egyen és kvázi-ellenáram esetére a következő összefüggést javaslom,

$$Nu = 29,59 \cdot Re_F^{0,2371} \cdot Pr^{1/3},$$

míg teljes keresztáramú kapcsolásra a

$$Nu = 55,40 \cdot Re_F^{0,1897} \cdot Pr^{1/3}$$

összefüggést. A bemutatott összefüggésekben a jellemző geometria a Schmidt-féle összefüggéssel számítandó, és légköri nyomási levegő közegre alkalmazható. A tézishez tartozó publikációk: (1) (4) (6) (7).

T3.1. A bordáscsőves hőcserélők egyszerűsített vizsgálatára irányuló elemzéseim azt mutatták, hogy már a négyszög alakú bordák esetében sem élhetünk az egyszerűsítés adta lehetőségekkel, ilyen hőcserélők számításánál mérési kísérletekkel kell a hőátadási tényezőt meghatározni.

- T4. Csőoldalon kétjáratú rácsos bordás hőcserélőn végzett mérések eredményéből kimutattam, hogy a bordáscsőves hőcserélőkre általánosan elérhető tapasztalati összefüggések nem alkalmazhatóak. Több üzemállapotban végzett mérés eredményeképpen, az ilyen típusú autóhűtő radiátorok hőtechnikai számításához a

$$\text{Nu}_l = 0,817 \cdot \text{Re}_l^{0,6} \cdot \left(\frac{A}{A_{t0}} \right)^{-0,39} \cdot \text{Pr}_l^{1/3}$$

Nu-szám összefüggést határoztam meg. Az összefüggés légköri nyomású levegő közegre alkalmazható.

A tézishez tartozó publikációk: (3) (5).

- T4.1. Bemutattam, hogy a hőtechnikai számításoknál nem szabad elhanyagolni a hűtőlevegő nedvességtartalmának hatását, továbbá a mérési eredményekkel bizonyítottam, hogy a csőtérben kialakult lamináris áramlás esetén sem feltételezhetjük a Nu-szám értékét konstansnak, az áramlási sebesség változásával a belső oldalon lévő hőátadási tényező is változik.
- T4.2. Rácsos bordás hőcserélők esetén bemutattam, hogy a bordák számának növelésével a berendezés hőteljesítménye is nő, azonban a tömegegységre vonatkoztatott hőteljesítmény görbe maximumponttal rendelkezik, ami biztosítja a berendezés optimalitását. A bordák vastagságának is jelentős hatása van erre a maximumpontra, a nagyobb szélességű bordák a kisebb bordaszámok felé tolják, de növelik a maximum értékét, míg a kisebb szélességű bordák a nagyobb bordák felé mozdítják, de az értéke ezek esetén kisebb érték lesz.
- T5. A hőcserélő szerkezetek alátámasztására is alkalmas acélszerkezetek optimalizálásával kapcsolatban bemutattam, hogy amennyiben az oszlopot csak rúdírányú nyomóerő terheli, sokkal célszerűbb a szekrényszelvény keresztmetszet alkalmazása, mint az I-szelvényé, sokkal kisebb keresztmetszeteket fog igényelni. Bemutattam továbbá azt is, hogy a helyi horpadási feltétel miatt I-szelvények esetén a 355 MPa folyáshatárhoz tartoznak a legkisebb keresztmetszetek, míg szekrényszelvények esetén az API eredményeit leszámítva a 460 MPa folyáshatárú acélhoz.
- A tézishez tartozó publikációk: (11) (12) (13) (14) (15).

- T5.1. Bemutattam, hogy amennyiben a rúdírányú nyomóterhelés hajlítónyomatékkal egészül ki, minél nagyobb arányú ez a nyomaték a gerinclemez tengelyére merőlegesen, annál jobban a szekrényszelvény alkalmazása javasolt. Amennyiben viszont biztosítani tudjuk, hogy ez a terhelés a gerinclemez síkjában hasson, akkor viszont az I-szelvény alkalmazása javasolt. Hajlított nyomott rudak esetén egyértelműen bebizonyítottam, hogy a nagyobb folyáshatárú acélok alkalmazása javasolt, nagyobb szilárdsági jellemzőkhöz kisebb teherviselő keresztmetszet társul.

4 Az eredmények alkalmazhatósága

Kutatómunkám alapfeladata a hőcserélő berendezések optimalitásának bebizonyítása volt. A vizsgálataim tárgyául választott cső a csőben és csőköteges hőcserélők esetén ezt sikerült bizonyítanom. A csőköteges hőcserélők csőszámának meghatározásához számítási algoritmust készítettem, mely a tervezőmérnököknek is segítséget jelent. A különböző bordáscsöves hőcserélők esetén viszont általánosan alkalmazható tapasztalati összefüggéseket találtam a szakirodalomban. Ennek kísérleti vizsgálatához mérőberendezést építettünk, melyben kétféle növelt felületű hőcserélőt, egy klasszikus bordáscsöves típust, valamint egy rácsos bordás típust vizsgáltam. Mindkét esetben azt tapasztaltam, hogy az általános összefüggés pontatlan eredményt szolgáltat, ennek következtében a hőátadási folyamat vizsgálatával is foglalkoznom kellett. Mindkét vázolt esetben új tapasztalati összefüggést határoztam meg.

A hőátadási folyamatok vizsgálatához a numerikus szimulációs környezetet is felhasználtam. Ez kettős előnyt jelent számunkra: egyrészt olyan paraméterek mérhetők vele, amely egy valós berendezés valós üzeme során sem lehetnek mérhetők (például felület- vagy térfogat átlagolt hőmérsékletek, felületelemeken vett erők, nyomások, nyomatékok), másrészt a geometriai és/vagy technológiai paraméterek kis módosításainak vizsgálatára is alkalmasak. Kutatásaim során mindkét előnyét kihasználtam: csőköteges hőcserélők esetén a terelőlemezek hatását a hőtechnikai és gyártási költségek optimumára vonatkozóan, valamint bordáscsöves hőcserélők esetén a mért értékekkel történő összehasonlításra is.

A hőcserélő berendezések alátámasztására szolgáló acélszerkezetek tágabb értelemben szintén besorolhatók a vizsgált rendszerbe. Ezeknél a nyomott, illetve hajlított-nyomott gerendáknál a különböző szilárdságú szerkezeti acélok szükséges keresztmetszet területeit hasonlítottam össze, különböző szabványi előírások alapján. Az optimális eredményeiből a vizsgált esetekre következtetéseket vontam le, melyek a tervező mérnökök számára hasznos alapot szolgáltathatnak.

5 A disszertációhoz kapcsolódó publikációk

- (1) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *CFD analysis and heat transfer characteristics of finned tube heat exchangers*, *Pollack Periodica*, 2019, 14(3), pp.165-176.
- (2) Petrik, M., Szepesi, G.: *Shell side CFD analysis of a model shell-and-tube heat exchanger*, *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 70, pp.313-318.
- (3) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K., Bolló, B.: *Theoretical and parametric investigation of an automobile radiator*, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2017, PartF12, pp.27-37.
- (4) Petrik, M., Szepesi, G.: *Experimental and numerical investigation of the air side heat transfer of a finned tubes heat exchanger*, *Processes*, 2020, 8(7), 773, 15p.
- (5) Petrik, M., Erdős, A., Jármái, K., Szepesi, G.: *Experimental Investigation of the Air-Side Heat Transfer Coefficient on Louver Finned Tube Automotive Radiator*, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, 22, pp.401–416.
- (6) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Heat transfer analysis for finned tube heat exchangers*, *Solutions for Sustainable Development - Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development, ICES2D 2019*, 2020, pp.56–66.
- (7) Petrik, M., Szepesi, L.G., Jármái, K.: *Heat transfer analysis for finned tube heat exchangers*, *Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development, (ICESD 2019)*. University of Miskolc, Oct. 3-4, 2019. CRC Press, London, 11p. (2019), ISBN: 9780367824037
- (8) Petrik, M., Szepesi, G., Varga, T.: *Numerical and experimental study of finned tube heat transfer characteristics*, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2018, 0(9783319756769), pp.563–570.
- (9) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Optimal design of double-pipe heat exchangers*, *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization : Proceedings of the 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO12)*, Cham, Svájc : Springer Nature (2017) pp.755-764.
- (10) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Optimal design of double-pipe heat exchangers, comparisons*, *MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference* Miskolc, Magyarország : Miskolci Egyetem, (2017) Paper: 96_Petrik_Mate.pdf , 12p.
- (11) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Optimal design of shell-and-tube heat exchangers*, *The Publications of the MultiScience - XXX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference* Miskolc, Magyarország : University of Miskolc, (2016) Paper: D4_15_Petrik_Mate.pdf, 7p.

- (12) Jármái, K., Petrik, M.: *Minimum mass design of compressed I-section columns with different design rules*. **Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESaT 2018)**, Editors: Mohamad Al Ali, Peter Platko, pp.119-124. CRC Press, ISBN 9780367075095 - CAT K405631, Scopus
- (13) Jármái, K., Petrik, M.: *Optimization and comparison of different standards for compressed welded box columns*, **Pollack Periodica**, 2020, 15(1), pp.3–14
- (14) Jármái, K., Petrik, M.: *Cost minimization of compressed I-section columns with different design rules*, **3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies : ESAT 2018** Košice, Szlovákia : Technical University of Kosice, (2018) Paper: 030 - Jármái, Petrik.pdf , 4p.
- (15) Jármái, K., Petrik, M.: *Optimization and comparison of welded compressed columns*, **69th Annual Assembly of International Institute of Welding**, Melbourne, July 10 - July 15, 2016, Australia, Doc. No. XV-1520-16, 6p.
- (16) Petrik, M., Jármái, K.: *Optimization and comparison of welded I- and box beams*, **International Conference on Innovative Technologies : IN-TECH 2016** Faculty of Engineering University of Rijeka, (2016) pp.119-122., 4p.
- (17) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Csőköteges hőcserélők optimális méretezése*, **GÉP** 67 : 3 pp.23-27, 5p. (2016)
- (18) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Csőköteges hőcserélő cső oldali hőátadásának analitikus és numerikus számításnak összehasonlítása mérési eredményekkel*, **GÉP** 69 : 2 pp.25-28. (2018)
- (19) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Bordáscsöves hőcserélő hőátadási folyamatának vizsgálata CFD-vel*, **GÉP** 70 : 2 pp. 27-31., 5p. (2019)
- (20) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K.: *Csőköteges hőcserélő csőoldali hőátadásának vizsgálata CFD szimulációval*, **Doktoranduszok Fóruma 2017 : Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa** Miskolc, Magyarország : Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Rektorhelyettesi Titkárság, (2018) pp.76-81.
- (21) Petrik, M.: *Szerkezetoptimalás jelentősége a vegyipari gépészet területén*, **Doktoranduszok fóruma 2018 : Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa**, Miskolc, Magyarország : Miskolci Egyetem, (2019) pp.67-72.
- (22) Jármái, K., Petrik, M.: *Hegesztett aszimmetrikus I-tartók optimális méretezése a minimális hegesztési vetemedéshez*, **GÉP LXXI.:2**. pp.19-26. (2020)
- (23) Jármái, K., Petrik, M.: *A hegesztett aszimmetrikus I-gerendák optimális kialakítása a minimális vetemedés érdekében*, **HEGESZTÉSTECHNIKA** 30 : 1 pp.19-35. (2019)
- (24) Jármái, K., Petrik, M.: *Hegesztett, nyomott tartók optimalása és összehasonlítása*, **HEGESZTÉSTECHNIKA** 29: 3 pp.21-31. (2018)

*A disszertációhoz nem kapcsolódó egyéb publikációk

- (24) Kriston, B., Pusztai, T., Petrik, M.: *Állóhengeres kondenzátor rezgéstani vizsgálata, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye* 10: 2 pp.141-152. (2020)
- (25) Takács, D., Erdős, A., Petrik, M.: *Időben változó hőátadás matematikai modellje és CFD szimulációja, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye* 10: 1 pp.99-109. (2020)
- (26) Török, D., Petrik, M., Szepesi, L. G.: *Folyadékbehatolásos vizsgálatok elemzése számítógépes képfeldolgozás alkalmazásával, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 10: 1 pp.110-118. (2020)
- (27) Voith, K., Petrik, M., Spisák, B., Szamosi, Z., Szepesi, L.G.: *EPS vagy XPS? Irodalmi áttekintés, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 10: 3 pp.50-60. (2020)
- (28) Petrik, M.: *Szerkezetoptimalás jelentősége a vegyipari gépészet területén* In: Vadászné, Bognár Gabriella; Piller, Imre (szerk.) *Doktoranduszok fóruma 2018: Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa* Miskolc, Magyarország : Miskolci Egyetem, (2019) pp.67-72.
- (29) Petrik, M.: *A review article about the thermal runaway mechanism of lithium based batteries* In: Kékesi, Tamás (szerk.) *MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference Miskolc-Egyetemváros*, Magyarország : Miskolci Egyetem (2019) pp.1-8. Paper: D3-5.
- (30) Jármái, K., Kota, L., Petrik, M.: *Oszlopok tervezése lokális tűz esetén* Miskolc, Magyarország : Gazdász Elasztik Kft. (2018), 98p. ISBN: 9789633581698
- (31) Petrik, M., Szepesi, G., Jármái, K. Bolló, B. : *Autóhűtő elméleti és parametrikus vizsgálata* In: Kovács, László; Piller, Imre (szerk.) *Doktoranduszok Fóruma 2016 : Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa Miskolc-Egyetemváros*, Magyarország : Miskolci Egyetem, (2017) pp.73-78.
- (32) Petrik, M., Erdős, A., Jármái, K., Szepesi, G.: *Optimum Design of an Air Tank for Fatigue and Fire Load*, *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA* 18: 3 pp.163-177. (2021)
- (33) Petrik, M., Jármái, K., Szepesi, G.: *Időben változó hőátadás numerikus és analitikus számítási lehetőségei*, *GÉP LXXII* : 1-2 pp.53-57. (2021)

Hivatkozások

- [1] D. Eryener. Thermoeconomic optimization of baffle spacing for shell and tube heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 47(11-12):1478–1489, 2006.
- [2] J. Taborek. *Shell and tube heat exchangers: Single phase flow. Heat Exchanger Design Handbook, Section 3.3*. New York: Hemisphere, 1982.
- [3] A. El Mouatasim. Two-phase generalized reduced gradient method for constrained global optimization. *Journal of Applied Mathematics*, 2010, 11 2010.
- [4] Kobayashi Y., S. Kondo, and Y. Togo. Application of sequential unconstrained minimization technique to lmfbr core design optimization problem. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 11(11):471–479, 1974.
- [5] C. Byrne. Sequential unconstrained minimization algorithms for constrained optimization. *Inverse Problems - INVERSE PROBL*, 24, 02 2008.
- [6] P. Pongsoi, S. Pikulkajorn, and S. Wongwises. Heat transfer and flow characteristics of spiral fin-and-tube heat exchangers: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79:417–431, 2014.
- [7] M. Zhang, F. Meng, and Z. Geng. CFD simulation on shell-and-tube heat exchangers with small-angle helical baffles. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 9(2):183–193, 2015.
- [8] S. Unger, M. Beyer, M. Arlit, P. Stasch, and U. Hampel. An experimental investigation on the air-side heat transfer and flow resistance of finned short oval tubes at different tube tilt angles. *International Journal of Thermal Sciences*, 140(May 2018):225–237, 2019.
- [9] A. Zavala-Rio, R. Femat, and R. Santiesteban-Cos. An analytical study of the logarithmic mean temperature difference. *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 4(3):201–212, 2005.
- [10] Farkas J. és Jármai K. *Optimum design of steel structures*. Springer Verlag, Heidelberg, 2013.
- [11] Eurocode 3. Part 1.1.: Design of steel structures. General rules and rules for buildings. Standard, European Committee for Standardization. Brussels, 1992.
- [12] JRA Part I-V: Specifications for Highway Bridges. Standard, Japan Road Association, 2012.
- [13] API Bulletin 2V: Design of Flat Plate Structures, Third Edition. Standard, American Petroleum Institute, June 2004.
- [14] AISC Design Guide 28: Stability Design of Steel Buildings. Standard, American Institute of Steel Construction, 2005.
- [15] Yan Wu, Shuai Zhang, Ruiqi Wang, Yufei Wang, and Xiao Feng. New model for large scale chemical industrial layout optimization. *Chemical Engineering Research and Design*, 161:58–71, 2020.
- [16] Yuan XU, Zhenyu WANG, and Qunxiong ZHU. An improved hybrid genetic algorithm for chemical plant layout optimization with novel non-overlapping and toxic gas dispersion constraints. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 21(4):412–419, 2013.