

Folyadékos napkollektorok hőhordozó közegének paraméterei és áramlási viszonyai

Doktori értekezés

Hegyi Károly

Gödöllő 2009

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrár műszaki tudományok

vezetője: Dr. Farkas István egyetemi tanár, DSc SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető: Dr. Farkas István egyetemi tanár, DSc SZIE, Gépészmérnöki Kar, Környezetipari Rendszerek Intézet, Fizika és Folyamatirányítási Tanszék

Az iskolavezető jóváhagyása A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	5
1. BEVEZETÉS	7
1.1. A választott témakör jelentősége	7
1.2. Célkitűzések	8
2. IRODALMI ÁTEKINTÉS	.11
2.1. Megújuló és hagyományos energiaforrások felhasználása	.11
2.1.1. Globális energetikai helyzetkép	.11
2.1.2. Hazai energetikai helyzetkép	.16
2.1.3. A napenergia felhasználás lehetőségei hazánkban	.17
2.1.4. Az oktatásra, kutatásra és ismeretterjesztésre háruló feladatok	.20
2.1.5. A SZIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszék napenergia	
kutatásai	.21
2.1.6. A folyadékos napkollektor	.21
3. ANYAG ES MODSZER	.25
3.1. A szolárfolyadék	.25
3.2. A szolárfolyadék viszkozitásának mérése	.27
3.2.1. A szolárfolyadék viszkozitásának mérése Rheotest rotációs	
viszkoziméterrel	7
3.2.2. A szolárfolyadék viszkozitásának mérése Höppler viszkoziméterrel	28
3.3. A szolárfolyadék sűrűségének mérése	.30
3.4. A szolárfolyadék hővezetési együtthatójának mérése	.31
3.4.1. A hővezetés mérésére használt mérőberendezés	.31
3.4.2. A mérőkészülék matematikai modellezése	.35
3.4.2.1. A hőtranszportegyenlet hengerszimmetrikus esetben	35
3.4.2.2. A hőtranszportegyenlet numerikus megoldása	
véges térfogat módszerével	38
3.4.2.3. A numerikus számítás eredményei	40
3.4.3. A hővezetési együttható mérési elmélete	.42
3.5. Szolárfolyadék fajhőjének mérése	.43
3.5.1. A mérőberendezés	.43
3.6. Szolárfolyadék törésmutatójának mérése	.46

4. A SZOLÁRFOLYADÉK PARAMÉTEREIRE VONATKOZÓ	
EREDMÉNYEK	49
4.1. Viszkozitás mérés eredmények Rheotest és Höppler	
viszkoziméterrel	49
4.1.1. A viszkozitás mérési eredmények értékelése	49
4.1.2. A szolárfolyadék viszkozitását meghatározó függvény	51
4.1.3. Polinomiális közelítés a szolárfolyadék viszkozitására	54
4.2. A sűrűségmérés eredményei	57
4.3. Hővezetési együttható mérési eredményei	58
4.4. A fajhőmérés eredményei	60
4.5. A törésmutató mérés eredményei	62
5. A FOLYADÉKOS NAPKOLLEKTOR ÁRAMLÁSI VISZONYAI	65
5.1. Az SKV típusú folyadékos napkollektor	65
5.1.1. Lamináris turbulens átmenet a kollektorban	65
5.1.2. A számítási eredmények értékelése	68
5.1.3. ANSYS programmal számolt áramlás	68
6. A FOLYADÉKOS NAPKOLLEKTOR ÜZEMELTETÉSE	71
6.1. A szolárfolyadék paramétereinek hatása	
napkollektor üzemeltetésére	71
6.2. Az üzemeltetés hatása a szolárfolyadékra	72
6.3. Korróziós termékek kiülepedése a csőfalra	78
6.3.1. A részecskék mozgása a lamináris határrétegben	78
6.3.2. Részecskék kiülepedése az áramlásból	81
6.4. Tanyák, farmok autonóm energiaellátása	
7. EREDMÉNYEK	93
7.1. Az eredmények összegzése	93
7.2. Angol nyelvű összegzés	94
7.3. Új tudományos eredmények	95
7.4. Következtetések és javaslatok	98
MELLÉKLETEK	99
M1: Irodalomjegyzék	99
M2: A dolgozathoz kapcsolódó saját irodalom	103
M3: A dolgozatban használt approximációs módszerek	108
a. A legkisebb négyzetek módszere	108
b. Approximáció Gram-Schmidt ortogonalizáció segítségével	108
M4: A hő-transzportegyenletet megoldó program szerkezeti felépítése	110
M5: A mérőpanel vezérlő és kiértékelő programja	113
KÖSZÖNETNYILVÄNİTÄS	117

JELÖLÉSJEGYZÉK

А	[m ²]	felület
α	[1]	keverési arány, hígítási arány
to	[°C]	fagyáspont
Re	[1]	Reynolds szám
ρ	$[kg/m^3]$	sűrűség
V v	[m/s)	sebesség, axiális sebesség
D	[m]	átmérő
η	[Pas]	dinamikai viszkozitás
Ť	[K]	abszolút hőmérséklet
t	[°C]	hőmérséklet
t	[s]	idő (a szövegben egyértelmű)
c c _p c _v	[J/kgK)]	fajhő
ϕ	$[W/m^2]$	hőfluxus
λ	[W/mK]	(belső) hővezetési együttható
V	[m ³]	térfogat
$d d_p d_v$	[m]	rétegvastagság
$R_p R_v$	[K/W]	termodinamikai ellenállás
R	[J/mol K]	univerzális gázállandó
Μ	[kg]	kaloriméter vízértéke
U	[V]	feszültség
U	[m/s]	a sebesség radiális komponense
Ι	[A]	áramerősség
E	[J/mol]	aktiválási energia
n	[1]	törésmutató
р	[Pa]	nyomás
D	[m]	átmérő
q Q	$[m^{3}/s]$	térfogatáram, hozam
ω	[1/s]	szögsebesség
F	[N]	erő

1. BEVEZETÉS

1.1 A választott témakör jelentősége

A Szent István Egyetem Gépészmérnöki Karán már régóta folynak kutatások a megújuló energiaforrásokkal kapcsolatban. A Doktori Iskola keretén belül több dolgozat készült el ezen témakörökben (szélenergia, biomassza, napenergiás szárítás stb.) [Zachár, 2003], [Géczyné, 2007], [Seres, 2002]. A Gépészmérnöki Kar Fizikai és Folyamatirányítási Tanszékén elsősorban a napenergia direkt felhasználásával kapcsolatos kutatások folynak már több, mint tizenöt éve. Ennek keretében a tanszéken a napenergiával kapcsolatos kutatási, oktatási és demonstrációs központ épült meg. Meteorológiai állomás mellett folyadékos napkollektor, napenergiás szárító, fotovillamos panelek, és passzív napenergiás fal található. A megújuló energia kutatással, különös tekintettel a napenergia kutatással kapcsolatban az eredmények országos és nemzetközi szinten is ismertek.

A közvetlen napenergia felhasználásnak a két legfontosabb ága: a fotovillamos cellák (napelemek, PV cellák) felhasználása illetve a használati melegvíz előállítását szolgáló napkollektorok. Sajnos a napelemek ára még viszonylag magas (kb. 1 MFT/kW), ezért a magas beruházási költség miatt még nem rentábilisak, viszont várhatóan ezek lesznek a legfontosabbak a napenergia-felhasználásban.

A használati melegvíz előállítására használható folyadékos napkollektorok már napjainkban is kifizetődők. Megtérülési idejük 5-8 év. Működésük lényegében egyszerű. A napsugárzást vízmelegítésre már régóta használják. A téli elfagyás elkerülésére az un. kétkörös napkollektorok terjedtek el. A napsugárzás egy fagyálló folyadékot melegít fel, és egy hőcserélőn keresztül melegítik fel a felhasználni kívánt vizet. A fagyálló folyadék az esetek többségében propilénglikol alapú (általában a propilén-glikol 50%-os vizes oldata). Α gépjárműveknél régóta használt fagyálló folyadékot (általában etilénglikol-víz keveréket) a napkollektoroknál nem szabad használni, mert egy esetleges hőcserélő meghibásodás esetén a mérgező etilénglikol bekerülhet a melegvízbe. A propilén glikol nem mérgező, felhasználják az élelmiszeriparban és a gyógyszeriparban is. Mivel fagyáspontja alacsony (50%-os vizes oldatának fagyáspontja kb. mínusz 30 °C) alkalmas a napkollektorok hőhordozó közegének. A napkollektorok hatásfokának javítása aktuális feladat.

A napkollektorok fejlesztése hasonlítható a technika történetben a gőzgép fejlesztéséhez. A gőzgépet, feltalálása után (James Watt-1784) már javában használták, amikor kutatások kezdődtek a hatásfok javításával kapcsolatban. Az első jelentős eredményt Sadi Carnot adta, a róla elnevezett ideális Carnot-ciklus termodinamikai hatásfokának kiszámításával Eredményét 1824-ben mutatta be a Francia Tudományos Akadémián. A termodinamika fejlődésének hatására a hőerőgépek hatásfokát a kezdeti 5-10 % -ról kb. 50%-ra sikerült javítani.

1.2 Célkitűzések

Ahhoz, hogy a napkollektorok hatásfokát javítani lehessen napkollektor tervezéskor illetve az üzemeltetési paraméterek beállításához, ismernünk kell többek között a hőhordozó közeg azon anyagi paramétereit, amelyek a működés, illetve hatásfok szempontjából fontosak. Sajnos a hozzáférhető irodalomban ezek a fizikai paraméterek hiányosak.

Célul tűztem ki a propilénglikol legfontosabb fizikai paramétereinek meghatározását és e paraméterek napkollektor működésére kifejtett hatásának vizsgálatát. Pontosabban a propilénglikolnak nagyon kis mennyiségű adalékokkal (korrózió inhibitorok stb.) kevert oldatát vizsgáltam. Az így kapható folyadékot és ennek vizes oldatát a továbbiakban szolárfolyadéknak nevezem.

A munkám során meghatározni kívántam a szolárfolyadék alábbi paramétereit:

- Sűrűség
- Dinamikai viszkozitás
- Optikai törésmutató
- Hővezetési együttható
- Fajhő
- Kolorimetrikus tulajdonság

A szolárfolyadék ezen paramétereit egyrészt általam hozzáférhető mérőeszközökkel határoztam meg, másrészt magamnak kellett a mérőeszközt tökéletesíteni, illetve szükség esetén új mérőeszközt készítenem. Alapvetően a szolárfolyadék fizikai paramétereit kívántam megvizsgálni az összetétel illetve a hőmérséklet függvényében.

A napkollektor működése és hatásfoka szempontjából a célul kitűzött fizikai paraméterek a legfontosabbak, ezért más szempontokból a szolárfolyadékkal nem kívántam foglalkozni (elektromágneses, kémiai stb.).

Az így meghatározni kívánt anyagi paraméterek segítségével egy konkrét napkollektor áramlási viszonyait és a paramétereknek a működésre való hatását szándékoztam megvizsgálni.

A meghatározni kívánt paraméterekkel kapcsolatos megjegyzéseim:

• A szolárfolyadék (a propilénglikol vizes oldata) összetételét általában térfogat százalékban adjuk meg. Ahhoz, hogy tömegszázalékban is ismerjük az összetételt alapfontosságú a szolárfolyadék sűrűségének ismerete.

- Áramlási szempontból a legfontosabb anyagi paraméterek egyike a folyadék viszkozitási együtthatója. A későbbiekben részletezem, hogy a napkollektorban a hőátadás szempontjából fontos, hogy az áramlás lamináris vagy turbulens. A turbulens áramlás szempontjából az un. Reynolds szám a meghatározó, amelynek egyik összetevője a viszkozitás.
- Az optikai törésmutató alapján nagyon pontosan meg lehet határozni a szolárfolyadék víztartalmát, aminek az összes anyagi paraméterre hatása van.
- A hőhordozó hővezetési együtthatójának ismerete alapvető fontosságú egy hőtechnikai berendezésnél.
- Hasonlóan a fajhő, mint alapvető hőtechnikai paraméter ismerete a napkollektor működési tulajdonságait határozza meg.
- Több éve működő napkollektorokban a hőhordozó színe feltűnően megváltozott (megsárgult, megbarnult), ezért tűztem ki a szolárfolyadék fényelnyelésének vizsgálatát (kolorimetriás vizsgálatát) a fény hullámhosszának függvényében.
- Bizonyos üzemzavarok esetén (szivattyú leállás, stb.) a szolárfolyadék az általános üzemi hőmérséklet fölé emelkedhet. Célul tűztem ki ennek vizsgálatát is.

A szolárfolyadék anyagi paramétereinek kihatása van a napkollektor üzemeltetésére. Konkrét napkollektor esetén is változtatható a hőhordozó közeg sebessége a keringtető szivattyú segítségével. Kis sebességeknél az áramlás lamináris, nagyobb sebességeknél az áramlás turbulenssé válhat (a napkollektoros rendszer különböző szakaszaiban eltérő sebességeknél következhet be a turbulens átmenet. A hőátadás szempontjából a lamináris esetben gyakorlatilag a folyadék hővezetése a meghatározó, turbulens áramlásnál a hővezetést a hatékonyabb hőáramlás váltja fel. (a vékony határrétegben továbbra is a hővezetés játszik jelentős szerepet). Mivel a turbulens átmenet a Reynolds számtól függ (Re_{kritikus}= 2320), az anyagi paraméterek a turbulens átmenetet befolyásolják.

Célom volt a hőhordozó közeg anyagi paramétereinek az áramlásra gyakorolt hatásának vizsgálata. Elsősorban a turbulens átmenetet akartam vizsgálni.

Az üzemeltetés során a szolárfolyadék elszíneződését elsősorban a szolárfolyadék fényelnyelésével, fotokolorimetriával kívántam vizsgálni. Célul tűztem ki annak vizsgálatát, hogy az üzemeltetés során bekövetkező esetleges túlmelegedések milyen változásokat okoznak a hőhordozó közegre.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Megújuló és hagyományos energiaforrások felhasználása

2.1.1 Globális energetikai helyzetkép

társadalmi feilődés napjainkban szoros összefüggésben A van az energiafelhasználással, elsősorban a villamos energia felhasználással. Annak ellenére, hogy az anyagi javak 80%-át az emberiség 20%-a ellenőrzi, jelek vannak a Föld globális ökológiai katasztrófájára [Mika, 2002]. Nyilvánvaló, hogy az elmaradott országok is igényt tartanak a fejlett ipari országokhoz hasonló anyagi fejlődéshez. Ahhoz, hogy ezt a fejlődést ki lehessen elégíteni a jelenlegi energiafelhasználást a többszörösére kellene emelni. A jelenlegi energiafajtákat vizsgálva megállapítható, hogy az energiatermelés legnagyobbrészt fosszilis energiahordozókon alapul [International, 1992], (lásd 2.1 ábra).



2.1 ábra Teljes primer energiaellátás szerkezete típusonként. (Forrás: KSH, 2008)

A történelmi fejlődés alapján másrészt látható a villamos energiatermelés nagyfokú *centralizálása*, koncentrált előállítása és annak elosztása. Gondoljunk csak arra, hogy a Paksi Atomerőmű egyik reaktorának 10 m³-nyi aktív zónájában 1400 MW a hőteljesítmény. A növekvő villamos energiatermelésre álljon itt egy hazai példa, Magyarország villamos energia termelésének időbeli fejlődése (lásd 2.2 ábra).

A fosszilis energiahordozó készletek kimerülő félben vannak, az idevonatkozó becslések – változatlan fogyasztást alapul véve – olajra kb. 40 év, szénre kb. 200 év [*OECD*, *1991*]. A fosszilis energiahordozók ára egyre növekszik (2.1 táblázat).

Energiahordozó	Egység	1986-90	1991	1993	1997	2000	2007
Gázolaj	Ft/kg	15,3	23,3	46,1	156,2	202	240
Szén	Ft/kg	3,1	4,9	5,8	25	28	35
Földgáz	Ft/m ³	5,5	10,5	11,8	23,7	28.5	37
Villamos energia	Ft/kWh	3,6	5,9	6,2	13,4	18.5	28

2.1 táblázat A legfontosabb energiahordozók árának alakulása (Forrás: KSH, 2008)

Csupán a villamos energiatermelés fejlődési trendjét figyelembe véve nem lenne meglepő, ha a megújuló energiaforrások elterjedésében is hasonló dinamikus növekedést tapasztalnánk.



2.2 ábra Magyarország villamos energia felhasználás időbeli fejlődése. (Forrás: Villamos Energia Évkönyv, Magyar Energia Hivatal, 2006)

Az utóbbi években az energiatermeléssel kapcsolatban a környezetszennyezési gondok is növekednek. A CO₂ szint növekedése előrevetíti egy növekvő átlaghőmérsékletű Föld lehetőségét az üvegházhatás miatt, azonban a CO₂ kibocsátás a folyamat szükségszerű velejárója és nem csökkenthető. A 2.3 ábrán látható, hogy az ipari forradalom óta exponenciálisan nő a levegő széndioxid tartalma.



2.3 ábra A légkör szén-dioxid-tartalmának alakulása az elmúlt ezer évben antarktiszi (Taylor Dome) jégminták (felső görbe), illetve a legutóbbi közel ötven évben (alsó görbe) végzett közvetlen légköri mérések alapján. (Forrás: Carbon Dioxide Information Analysis Center)

A kibocsátott NO_x és SO₂ pedig a savas esők révén a bioszféra pusztulását okozhatja. Annak ellenére, hogy a kibocsátott károsanyag csökkentésére történtek lépések, ennek hazai nagyságrendjét szemlélteti az 2.4, 2.5 és 2.6 ábra.







(Forrás: KSH, 2008)



2.6 ábra Magyarország NO_{X} kibocsátása (Forrás: KSH, 2008)

A maghasadáson alapuló energiatermelésnél az atmoszférába gyakorlatilag nem kerülnek ilyen szennyező anyagok, de főleg a Csernobilban történt nukleáris katasztrófa óta a társadalmi elfogadottsága romlott. Sokak szerint gondot okoz a radioaktív hulladékok elhelyezése és hosszú ideig való biztonságos tárolása, valamint az üzemelést befejező atomerőművek sorsa. Sajnos a nagymértékű energiakoncentráció miatt potenciálisan nagy a terrorizmus veszélye is. Ennek ellenére a becslések az atomerőművek jelenlegi 4 %-nyi részesesedésének megduplázódását várják 2020-ig a Földön. Sajnos a kimeríthetetlennek tűnő energiaforrás, a szabályozott fúziós energiatermelés az 50-es évek optimizmusával ellentétben várat magára és a közeljövőben nem is számolnak vele, annak ellenére, hogy Franciaországban több milliárd (!) eurós nemzetközi projekt kezdődött, amelynek keretében kísérleti fúziós erőművet építenek (ITER).

Természetesen tisztában vagyunk azzal, hogy ezen globális negatívumok ellenére a világ a pillanatnyi kétségtelen előnyök ellenére nem fog lemondani ezekről az energiahordozókról. A kiutat azonban hosszútávon a világ is az ún. megújuló energiaforrásokban látja, azaz a *napenergiában és annak közvetett formáiban*: a biomasszában, a szélenergiában, a geotermális energiában és a vízenergiában. Ezeknek az energiaforrásoknak is vannak esetenként káros környezeti és esztétikai hatásai (pl. vízierőművek, szélerőművek), de alapvetően környezetkímélők és az atmoszférát nem szennyezik [*Barótfi, 2003*]. Különböző szervezetek 2020-ra akár 30 %-nyi globális részesedést is prognosztizálnak. Magyarország hivatalos vállalásai a 2.2 táblázatban láthatók.

	2003	2010
EU összes megújuló	6%	12%
EU zöld áram	14%	22%
EU zöld hajtóanyag	0,3%	5,75%
Mo. összes megújuló	3,5%	7%
Mo. zöld áram	0,8%	3,6%
Mo. zöld hajtóanyag	0%	2%

2.2 táblázat: Az EU és Magyarország megújuló-energetikai vállalásai [Bohoczky, 2005] A továbbiakban a megújuló energiaforrások közül elsősorban a közvetlen napenergia felhasználás lehetőségével foglalkozom.

Amikor a napenergia lehetősége felmerül triviális annak környezetkímélő volta és forrásának gyakorlatilag kimeríthetetlensége. Ismert, hogy a szoláris konstans értéke 1350 W/m², ami azt jelenti, hogy a légkör felső határánál, a sugárzásra merőleges 1 m² felszínre 1 másodperc alatt jutó energia 1350 J [Duffie, 1991]. Kiszámítható, hogy a Földet érő napsugárzás energiaértéke 10000-szer nagyobb, mint az emberiség által jelenleg felhasznált energia. Ennek a sugárzásnak 30 %-át a Föld légköre visszaveri, további 20 %-át elnyeli. Figyelembe véve a felhők árnyékoló hatását is kb. 1000 W/m² értékkel számolhatunk. Az éjszakákat is beszámítva az átlagteljesítmény négyzetméterenként kb. 300 W/m². Ez az érték merőleges beesést tételez fel, az effektív teljesítmény értéke azonban a beesési szög koszinuszával csökken. Abban az esetben, ha a napsugárzásból villamos energiát szeretnénk nyerni számolnunk kell 10-30 % átalakítási hatásfokkal is [Farkas, 2005]. Ezen becslés alapján 50-100 W/m² átlagos energiatermeléssel számolhatunk. Látható tehát a hagyományos energiatermelési módokkal ellentétben a napenergiának viszonylag kicsi az energiasűrűsége és az éjszakák miatt időszakos a jellege, ami rögtön felveti az energiatárolás szükségességét. A napenergia felhasználását illetőleg a legtöbbet hangoztatott ellenérv viszonylagos drágasága. Jelenlegi árakkal számolva a közvetlen villamos energia előállítására használható napelemekkel, fotovillamos (PV) átalakítókkal, a magasabb beruházási költségek miatt, még jóval drágábban lehet villamos energiát termelni.

2.1.2. Hazai energetikai helyzetkép

Feltételezve egy növekvő ipari teljesítményt, és számolva a meglévő villamos energia erőművek amortizációjával a jelenlegi hazai energiapolitika a meglevő erőművek felújításával és modernizálással kívánja a szükséges energiát megtermelni (2.7 ábra). A jelenlegi tervek egy újabb báziserőmű megépítését célozzák 2000 MW nagyságrendben. Pillanatnyilag ez várhatóan egy szénerőmű vagy újabb atomerőmű blokk lenne. Valószínűsíthető a paksi atomerőműves blokkok élettartamának meghosszabbítása is. Várhatóan elsősorban politikai illetve társadalmi döntést igényel ennek kiválasztása. Nyilvánvaló, hogy ilyen nagyságrendű energiát megújuló energiákkal kiváltani ma nem lehet.



2.7 ábra. Magyarország GDP-jének, összenergia fogyasztásának (alsó görbe), és villamosenergia (felső görbe) fogyasztásának százalékos változása 1980 –as bázisévre. (Forrás: KTM Környezeti Elemek Főosztálya, 2005)

Az előző pontban leírtaknak figyelembevételével vizsgáljuk meg Magyarország vonatkozásában a megújuló energiaforrások lehetőségeit, különös tekintettel a napenergia felhasználást. Figyelembe véve a nemzetközi trendeket, a megújuló energiaforrások terén egy *szemléletváltásra* van szükség. Nyugat-Európában több országban felismerték ennek fontosságát, és programokat indítottak a napenergia hasznosításra (Németország, Svájc, Ausztria, Hollandia, stb.). Svájcban 50 MW összteljesítményű napelemes, villamos hálózatra dolgozó rendszert építettek ki autópályák védőfalaira, hegyoldalakra.

A napenergia viszonylag kis energiasűrűsége a globális nagy koncentrációjú energiatelepítések helyett a *lokális telepítés* gondolatát kínálja fel. Tipikusan jó felhasználási lehetőséget kínál ennélfogva a területileg szétszórt *mezőgazdasági felhasználásoknak*. Természetesen az alkalmazásoknál a komplex, csatolt energia-felhasználásra kell a hangsúlyt fektetni, felhasználva az adott helyen a potenciális energialehetőségeket. Így egy farmszerű termelési egységnél, akár az országos energetikai hálózattól független, az adott termelési egységet és az ott élő emberek energiaigényét kielégítő energiarendszert lehet megvalósítani.

2.1.3 A napenergia felhasználás lehetőségei hazánkban

Összehasonlítva a magyarországi főbb megújuló energiaforrások potenciális mértéke millió tonna olajegyenértékben (MtOE) a következő [*Farkas, 1989*]:

-szoláris potenciál	0.05	MtOE,
-geotermikus potenciál	0.2	MtOE,
-biomassza potenciál	3.5	MtOE.

Jelen dolgozatnak a biomassza felhasználás helyzetének értékelése nem tárgya. A napenergia felhasználását tekintve kiemelhetők a növényházak, üvegházak a szárítás valamint a technológiai melegvíz készítés. A közvetlen napenergia felhasználás mellett még szerepet játszhat a geotermális és a szélenergia felhasználása is [*Tóth, 2003*]. A napenergia alkalmazásának szélesebb körű elterjesztésének érdekében, az állami támogatási rendszer kedvezővé tétele mellett számos gyakorlati kérdést is meg kell oldani.

Növényházak, üvegházak

Tekintettel arra, hogy Magyarországon mintegy 150 ha alapterületű üvegházzal, 3000 ha vázszerkezetes és 1000 ha vázszerkezet nélküli fóliafelülettel rendelkezünk, ily módon a napenergia mint kiegészítő energiaforrás nagy jelentőséggel bír [*Imre, 2000*].

A növényházak napenergiával történő fűtésére három fő megoldás jön szóba:

1. A növényház mellett felállított napkollektorok által összegyűjtött energiát vizes hőtárolókban tároljuk, amelyet az éjszakai fűtési igény kielégítésére használunk fel.

2. A kollektort a növényházban helyezzük el úgy, hogy az éjszaka során az hőleadó felületként szolgáljon. Kézenfekvő megoldás, hogy a tetőszerkezet kettősfalu, amelyben napközben áramlott színesített víz veszi fel az energiát, majd éjszaka azt leadja pl. egy hagyományos fűtőrendszeren keresztül.

3. A növényházat, mint kollektort üzemeltetjük. Ebben az esetben a szellőztetéssel elvitt energiát kell tárolni, majd azt az éjszakai fűtés során felhasználni.

A növényházi alkalmazások során különös jelentősége van a lefedésre használt anyagoknak, a fix és mozgatható árnyékoló ill. energiaernyőknek, valamint a hőtárolási problémakör megoldásának (föld, víz, téglafal, fázisváltós anyagok, stb.) [*Imre, 1994*].

Szoláris szárítás

A szárítás továbbra is az egyik legfontosabb technológiai eszköz a mezőgazdasági termények tartósítására, tárolására. A szárításra felhasznált energiahordozók mennyisége jelentős arányt képvisel a teljes mezőgazdasági energiafelhasználásból (villamos energia 10%, földgáz 33%, olaj 12%). Ezért, túl az egyéb környezetvédelmi szempontokon az energia megtakarítás is jelentős szerepet játszik a szoláris terményszárítók hazai elterjesztésében [*Farkas, 1994*].

A szezonális üzemeltetés miatt alapvetően két út járható. Vagy kisméretű, egyszerű kivitelű, olcsó szárítókat alkalmazunk, vagy egy komplex, a gazdaság teljes energetikai rendszerébe integrált, szabályozott körülmények között üzemelő szárítót alakítunk ki. Ezen utóbbi esetben lehetővé válik a napenergia többcélú hasznosítása is, vagyis a szárítás szünetszakaszaiban az összegyűjtött napenergiát más technológiai célokra használjuk fel. Ugyanakkor, megfelelően méretezett hőtároló esetén éjszakai vagy esős időszakban a szárító tárolt napenergiáról is üzemeltethető.

A szárításra szóba jövő termények köre a következő: szemestermények (gabona), széna, vetőmagvak, dohány, gyógynövények, fa, valamint zöldség és gyümölcsfélék.

Technológiai melegvíz készítés

A háztartási melegvíz felhasználás mellett számos olyan viszonylag alacsony hőmérsékletigényű technológiai folyamat van az iparban és mezőgazdaságban, ahol a szükséges melegvíz igényt szoláris rendszerek alkalmazásával lehet biztosítani. Ezek közül kiemelhetők a következők:

-intenzív akvakultúrák vízellátása,

-tehenészeti telepek vízellátása,

-biogáz rendszerek melegvízellátása,

-istállóépületek padlófűtése.

Geotermális energia hasznosítása

Bár a szabadkifolyású kutak vízhozama egyre csökkenő tendenciát mutat, a geotermális energia felhasználása még mindig nagy jelentőséggel bír. Ennek oka a mélyfúrási technikák valamint az energiatakarékos módszerek elterjedésével magyarázható. A geotermális energia fő hasznosítási területei: növényházak, baromfitelepek, sertéstelepek, épületek fűtése, halastavak temperálása, használati melegvíz készítés és szárításra történő felhasználás. Jelenleg Magyarországon mintegy 700 000 m² növényház ill. 1 millió m² fóliafelület található, ahol geotermális energiát hasznosítanak.

Szélenergia alkalmazása

Magyarországon a kis szélsebességek miatt földközelben elsősorban a sűrűlapátozású szélmotorok alkalmazása jöhet szóba. A fő felhasználási területük: vízszivattyúzás, öntözés, lokális villamos energiatermelés (akkumulátorok töltése, világítás, vízmelegítés) valamint levegőztetési, szellőztetési feladatok megoldása. Indokoltnak tűnik a kombinált rendszerbe való beillesztés. Itt elsősorban fotovillamos rendszerrel való együttes alkalmazás jön szóba. Az utóbbi időben több 30-50 m magasságú, MW nagyságrendű szélerőművet is felállítottak és a szélenergia potenciál feltérképezése is folyik.

Megoldandó gyakorlati kérdések

A napenergia alkalmazásai során számos gyakorlati kérdéssel is foglalkozni kell. Ezek közül a legfontosabbak a következők:

- a szoláris rendszerelemek cserélhetősége,
- tisztítás, karbantartás,
- -hatásfok javítás
- korróziós probléma, fagyálló folyadékok alkalmazhatósága,
- a szoláris rendszerkomponensek anyagainak javítása,
- a szükséges hőmérséklettartományban optimálisan működő kollektorok kiválasztása,
- a tároló optimális méretének megállapítása,
- szabályozó rendszerek alkalmazhatósága,
- többcélú hasznosítás,
- az előállított termékek minősége, veszteségek csökkentése,
- gazdaságosság.

2.1.4 Az oktatásra, kutatásra és ismeretterjesztésre háruló feladatok

Ha nem késői követői kívánunk lenni ennek a nemzetközi fejlődésnek, kívánatos már a korai szakaszban mielőbb bekapcsolódni hazai kutatásokkal a napenergia felhasználásba. Tudományos szempontból ennek lehetőségei fennállnak. 1983-ban megalakult a Nemzetközi Napenergia Társaság (ISES) Magyar Tagozata, amely további tagokkal kibővülve 1990 óta Magyar Napenergia Társaság néven működik. Nemzetközi elismerését igazolja, hogy Magyarország rendezhette meg az ISES Világkongresszust és Kiállítást 1993-ban.

Ma már kevés csak szakmai körökben a megújuló energiaforrások, illetőleg a napenergia fontosságát hangsúlyozni. Természetes, hogy az ebben a témában dolgozók megértik ennek fontosságát. Annál fontosabb a szemléletváltozás segítésében a laikus közvélemény bevonása és a tanuló *fiatalság körében végzett ismeretterjesztő*, téveszméket eloszlató ismertetés.

Szemben más országokkal, ahol állami vagy önkormányzati szinten támogatják a napenergia lakossági felhasználását, Magyarországon a támogatás még mindig minimális, annak ellenére, hogy például a passzív napenergia felhasználás az építészetben már ma sem lényegesen drágább a hagyományos technológiáknál.

A hagyományos energia ára - amelyet a megújuló energia megvalósítási árával összehasonlítanak - különben is bizonyos szempontból megtévesztő. Célszerű volna az energia árába beszámítani a közvetlen előállítási költségeken kívül az egyéb, a környezeten és az emberi egészségen okozott károkat is (externális költségek). Az erőművek egészségügyi károsítását, az üzemanyag szállítása közben okozott károkat például nem számítják be az előállítás árába.

2.1.5 A SZIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszék napenergia kutatásai

A fentiek ismeretében fontosak a Fizika és Folyamatirányítási Tanszéken a napenergia felhasználási lehetőségeit bemutató kutatási és demonstrációs berendezések.

A Fizika és Folyamatirányítási Tanszék területén olyan oktatási demonstrációs eszközcsoport épült ki, amely a legkülönbözőbb érdeklődésű emberek számára is elérhető, amely lökést adhat ahhoz a felismeréséhez, hogy a napenergia és a különböző napenergiás technológiák a mindennapi háztartási, ipari és mezőgazdasági energiaigények kielégítésében jelentős szerepet játszhatnak.

A központ egy meteorológiai állomást, fotovillamos rendszert, egy folyadékos napkollektort, és egy napenergiás szárítóegységet foglal magában.

A fotovillamos egységgel energiatárolót (akkumulátort) töltünk.

Az alkotóelemek mindegyikéhez különböző szenzorokat kapcsolva az egész rendszer a megfelelő hardver segítségével egy számítógéphez kapcsolódik, s ez biztosítja a végbemenő folyamatok részletes, hosszú távú monitorozását és dokumentálását.

A SZIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszék tervezésében készült el a gödöllői egyetemi kollégium tetején egy 10 kW csúcsteljesítményű fotovillamos naperőmű. Ma Magyarországon ez a legnagyobb teljesítményű fotovillamos rendszer.

1.2.2 A folyadékos napkollektor

Mivel vizsgálatunk tárgya az ún. folyadékos napkollektorok hőhordozó közeg, ezért nézzük meg magát a berendezést. Többféle kialakítású kollektor létezik, de a leggyakrabban az ún. sík-kollektorokat alkalmazzák. A gyakorlatban döntő többségében üvegezett, folyadék munkaközegű, sík-kollektorokat használnak. A 2.8 ábra egy folyadék munkaközegű sík-kollektor főbb részegységeit és felépítését szemlélteti.



2.8 ábra A sík-kollektor felépítése [*Gyurkovics, 1982*]

A kollektor legfontosabb részegysége az abszorber vagy elnyelő lemez, amely elnyeli a ráeső sugárzást, majd azt hővé alakítja és átadja az elnyelő lemezben kialakított folyadék járatokban áramló hőszállító közegnek.

Az abszorber lemezek és csövek általában jó hővezetési tulajdonságú anyagokból, rézből vagy alumíniumból készülnek, hogy minél nagyobb hatásfokkal adják át a hőt a munkaközegnek, mialatt az áthalad az abszorber lemezekben kialakított járatokon. A fényáteresztő fedéssel és szelektív bevonatú elnyelő lemezzel épített kollektorok esetén az üresjárási hőmérséklet - amikor a hőhordozó közeg nem áramlik - elérheti a 150-200 °C-t is. Ezért is célszerű fém abszorber lemezt alkalmazni.

Rossz hővezetési tulajdonságú abszorber esetén az elnyelő felület hőmérséklete jelentősen magasabb, mint a hőhordozó közegé. Ebben az esetben növekszik a sugárzási és konvektív veszteség, így a hatásfok csökken. Az abszorber lemez és a hőhordozó közeg közti hőátadás hatásfokára több más tényező is hatással van, így az abszorber lemez és a csövek vastagsága, a csövek osztása, az abszorber lemez és a csövek közötti kötés termikus ellenállása, valamint a cső és a folyadék közötti felületi hőátadási tényező.

A csőjáratok kialakítása lehet párhuzamos csövezésű (osztó-gyűjtős), mint ahogy az a 2.8 ábrán látható, vagy csőkígyós.

Az *abszorber lemezt* az esetek többségében a minél nagyobb napsugárzás elnyelés elérése érdekében matt feketére festik. A matt fekete festés hátránya, hogy jelentős az infravörös tartományban a hő kibocsátása. A saját visszasugárzás elkerülése érdekében a jó minőségű elnyelő lemezeket un. szelektív bevonattal látják el, ami csökkenti az abszorber lemez sugárzási hőveszteségét. Az ilyen bevonatok a napsugárzás tartományában nagy elnyelő képességgel rendelkeznek, míg a 3 µm feletti hullámhossz tartományban a saját visszasugárzásuk igen kicsi. Szelektív bevonatként általában galvanizálással felvitt nikkel-, vagy króm-oxidokat használnak.

A sík-kollektorok fedése: a fedés fényáteresztő és hőszigetelő képessége jelentősen befolyásolja a síkkollektorok hatásosságát. Fedés nélkül az abszorber lemez hővesztesége, különösen szeles körülmények esetén jelentős mértékű lenne és lehetetlenné válna magas hőmérséklet elérése. A fényáteresztő fedés reflexiója és abszorbciója okozta kismértékű napsugárzás csökkenés árán a kollektor hővesztesége jelentősen csökkenthető.

További költségbefektetéssel, egy második fedőréteg alkalmazásával az elérhető hőmérséklet növelhető. A második fedőréteg alkalmazása úgy válik egyre gazdaságosabbá, ahogy a kívánt melegvíz- és a környezeti levegő hőmérséklete közötti különbség növekszik..

A fedőanyagoknak a következő kívánalmaknak kell megfelelni:

- jó napsugárzás áteresztés,
- alacsony hősugárzás átbocsátás,
- jó ellenállás a napsugárzás és a légszennyező anyagok károsító hatásával szemben,
- megfelelő mechanikai ellenállás jégverés, hó, szél, ütés, szállítás és az üzemeltetés során fellépő hatásokkal szemben.

A gyakorlatban kollektor fedéshez általában alacsony vastartalmú 4 mm vastag edzett biztonsági üveget alkalmaznak. Az üveg előnye a jó fényáteresztő képesség és a megbízható, hosszú élettartam.

A kollektor hőszigetelése. Az abszorber lemezek mögött, a kollektor hátoldalán a hőveszteség csökkentése érdekében hőszigetelést alkalmaznak. Hőszigetelésre 40-80 mm vastagságban szálas ásvány- vagy üveggyapot lemezt alkalmaznak. Ha a kollektort az épület tetőszerkezetébe integráltan építik be, akkor a kollektor termikus ellenállása az épületből kifelé irányuló hőveszteség esetében nem lehet kisebb a környező tető szerkezeténél.

A kollektor dobozszerkezete. A jó minőségű, szelektív bevonatú kollektorok dobozszerkezetét korrózióálló kivitelben, általában alumínium lemezből mélyhúzott, vagy hajlított kivitelben, alumínium sajtolt profilból szegecselve, vagy csavarozva készítik. Egyszerű kivitelű kollektorok esetén a ház készülhet fából vagy műanyagból is. A doboz feladata a kollektor alkatészeinek fedése, az

abszorber és a hőszigetelés összefogása, zárt egységben tartása, a nedvesség bejutásának megakadályozása. Az 2.9-es ábrán a folyadékos napkollektor egy tárolótartály vizét melegíti, amit a 2.10 ábra szerint a téli hónapokban rásegítő fűtéssel melegítenek.







2.10 ábra A napenergia részesedése a használati melegvíz előállításban [Buzás, 1996]

A megújuló energiaforrások elterjedésének egyik akadálya a viszonylag magas áruk. Az ár azonban bizonyos szempontból a "tyúk-tojás" problémája. Amikor kevés napkollektort készítenek az ára magas, ha már elterjedt és nagyobb tételben állítják elő, akkor olcsóbb. Ezt bizonyítja a 2.11 ábra az elterjedés és ár közötti kapcsolatra.



2.11 ábra Napenergiás melegvíz készítő rendszerek piaci részesedésének és árának alakulása Hollandiában [*A. C. De GEUS, 1997*]

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 A szolárfolyadék

Vizsgálatom anyaga az ún. szolárfolyadék, ami lényegében propilénglikol vizes oldata.

A hőhordozó folyadéknak a fagyáspontjának legalább mínusz 20 °C-nak kell lenni, mert elvileg bizonyos üzemállapotban a külső hőmérsékletre hűlhet le. Kézenfekvő lenne az autóiparban elterjedt fagyálló (általában ez etilén-glikol vizes oldata) használata. Ezt azonban tilos használni, mert a hőcserélő meghibásodása esetén a mérgező etilénglikol bekerülhet a használati melegvízbe, ezért a nem mérgező propilénglikol vizes oldatát használják. A propilénglikolt az élelmiszeripar és a gyógyszeripar is használja. Kémiailag pontosabban:

1,2 propilén-glikol

Más elnevezésben: 1,2 propándiol,

1,2 dihidroxi-propán, metil glikol, metil-etilén-glikol, monopropilén-glikol (MPG)

Összegképlete: C₃H₈O₂



Molekulatömege 76,09

Forráspont: 187,4 °C (760 Hgmm-nél)

Fagyáspont: -60 °C

Az általam vizsgált folyadék a minőségi bizonyítvány szerint:

SOLAR folyadék

A tömény folyadék 3,99% vizet tartalmaz., fagyáspontja 1:1- es hígításnál -32 °C.

A tömény szolárfolyadék réz, acél és forraszanyagra vonatkozó kis mennyiségű korrózió inhibitorokat tartalmaz (bórax, nártiumbenzoát).

A későbbiekben ezt a tömény folyadékot higítottam desztillált vízzel. A hígítást a gyakorlatnak megfelelően térfogat százalékban adtam meg. Mivel a tömény szolárfolyadék a fentieknek megfelelően 3,99% vizet tartalmaz, ezért az x% szolárfolyadék tartalmú oldat 0,9601 x% propilén-glikol tartalmú. Ez praktikus szempontból nem lényeges különbség. (Pl. az 50%-os szolárfolyadék 48% propilénglikolt tartalmaz.)

Fagyáspont:

A szolárfolyadék fagyáspontját (t_o) [ASHRAE, 1965] alapján a következő két függvény alapján számolhatjuk

(α a propilénglikol részaránya százalékban)

1.
$$t_0 = -61,805 \alpha + 1,594$$
 (0< α <1)

És a pontosabb, de szűkebb tartományban használható:

2.
$$t_0 = y = -112,71\alpha^2 - 9,7238\alpha + 0,0055$$
 (0<\alpha<0,5)



3.1 ábra Szolárfolyadék fagyáspontja a hígítás függvényében

3.2 A szolárfolyadék viszkozitásának mérése

3.2.1 A szolárfolyadék viszkozitásának mérése Rheotest rotációs viszkoziméterrel

Ahhoz, hogy a szolárfolyadék reológiai típusát megtudjuk, ismernünk kell a folyadék folyási görbéjét (a nyírósebesség és nyírófeszültség közötti függvényt). A rendelkezésre álló viszkoziméter típusok közül (Engler, Ostwald, Höppler, rotációs) csak a rotációs típusú viszkoziméterrel tudjuk felvenni a folyadék folyási görbéjét. Ezért először a tömény szolárfolyadék viszkozitását mértem Rheotest 2.1 rotációs viszkoziméterrel.

A rotációs viszkoziméter mérési alapelve az, hogy két henger közti vékony folyadék réteget mérünk. A külső henger áll, a belső hengert állandó fordulatszámmal forgatja egy szinkronmotor. A fordulatszámot 12 állású mechanikus fordulatszámváltóval változtathatjuk. A hengerek közti rés olyan kicsi, hogy nem haladja meg a lamináris határréteg méretét, ezért az álló henger felületétől a forgó mérőhenger palástjáig a sebességgradiens lineárisan változik és a nyírósebesség állandó - adott fordulatszámnál (3.2 ábra).



3.2. ábra Rheotest 2.1 rotációs viszkoziméter elvi rajza és fényképe

A Rheotest 2.1 rotációs viszkoziméter klasszikus precíziós készülék, de a mérés kiértékelése nehézkes, több táblázat adatait kell kikeresni (mérőfej típus, fordulatszám váltó állása, stb.). A kényelmesebb méréskiértékeléshez számítógépes szoftvert készítettünk. [*Hegyi et al., 4, 1994*] A szoftverrel egyrészt a kiértékelés jóval kényelmesebb, mint a műszerhez adott gépkönyvvel való kiértékelés. Másrészt a szoftver képes megrajzolni a folyási görbét, és fájlműveletekre is alkalmas (3.3 ábra).



3.3 ábra A Rheotest 2.1 rotációs viszkoziméterhez készített kiértékelő szoftver menürendszere

3.2.2 A szolárfolyadék viszkozitásának mérése Höppler viszkoziméterrel

A Höppler viszkoziméter esősúlyos típusú műszer. Ha egy golyót, melynek sűrűsége nagyobb a folyadéknál, függőleges csőben levő folyadékban leejtünk, akkor s utat t idő alatt megtéve a Stokes közegellenállási törvény alapján a folyadék viszkozitása, ha a Reynolds szám (Re = $\rho_f v d / \eta$) kisebb egynél:

$$\eta = \frac{2gr^2}{9s} \left(\rho_g - \rho_f \right) t$$

Az összefüggésben ρ_f és ρ_g a folyadék illetve a golyó sűrűsége, d=2r a golyó átmérője, g a nehézségi gyorsulás.

A Höppler viszkoziméternél lényegében ezt az elvet használjuk ki azzal a módosítással, hogy az üveg cső belső átmérője alig nagyobb a golyó átmérőjénél. Ezzel a golyó sebessége olyan alacsony, hogy megfelelő golyóval kis Reynolds szám érhető el, és a golyó körül az áramlás lamináris marad. A csövet a függőlegestől 10 fokkal eldöntve biztosítható, hogy stabilan a cső belső falán csúszik le a golyó. Átlátszatlan folyadékok is jól mérhetők ezáltal, mert a golyó és a henger tapadási pontja kívülről jól látható. A mérés megismétléséhez a csövet a benne levő folyadékkal és golyóval együtt 180 fokkal elforgathatjuk. A cső kívülről egy másik üvegcsővel van körülvéve, melyben temperált folyadékot vezethetünk. Így a folyadék viszkozitásának hőmérsékletfüggése mérhető.

A viszkozitás a fenti egyenlethez hasonlóan számolható:

$$\eta = K \left(\rho_g - \rho_f \right) t$$

ahol K a folyadékban mozgó golyóra jellemző műszerállandó. Precíziós golyókból különböző sűrűségű és méretű készlet tartozik a műszerhez, hogy nagy viszkozitás tartományban lehessen mérni (3.4. ábra).



3.4 ábra Höppler viszkoziméter elvi ábrája

a - temperáló folyadéktartó
köpenye
b - ejtőcső
c - temperáló folyadék
kivezetés

- d temperáló folyadék bevezetés
- e vízszintező
- f forgási tengely
- g rögzítő csavar



3.5 ábra . Höppler viszkoziméter

3.3 A szolárfolyadék sűrűségének mérése

A szolárfolyadék sűrűségét az Archimédesz törvény alapján működő Mohr-Westphal mérleggel mértem a keverék százalékos arányának függvényében

A Mohr Westphal mérleg olyan kétkarú mérleg, melynek hosszabb karja 10 egyenlő részre van beosztva, a tizedik beosztásnál üveghenger függ, a másik karon szabályozható ellensúly van. (3.6 és 3.7 ábra). Az üvegtestet 4 ⁰C-os desztillált vízbe merítve a mérleg egyensúlyát egy ún. L lovassal a 10. pozícióba helyezve kiegyensúlyozzuk. Más sűrűségű folyadék esetén az egyensúly (L/10, L/100, L/1000) segítségével állítható helyre.



3.6 ábra Mohr-Westphal mérleg elvi rajza



3.7 ábra Mohr-Westphal mérleg

3.4 A szolárfolyadék hővezetési együtthatójának mérése

3.4.1 A hővezetés mérésére használt mérőberendezés

A folyadék hővezetési együttható mérésére többféle módszer is számításba jöhet (hot-wire módszer , hőfluxusmérés stb.) [*Beke, 2000*]. A lehetőségek közül praktikus okok miatt a stacioner mérési módszert választottam, mivel ez nem igényel túl gyors elektronikát. Az általam elkészített mérőberendezés hátránya, hogy a mérés időigényesebb, de a relatív mérési módszernek köszönhetőn nagyon pontos [*Fülöp, 1969*].

A 3.8 ábrán látható a mérőberendezés elvi elrendezése. Egy függőlegesen elhelyezett vékony henger felső része a mérés pontossága miatt a folyadék hővezetési együtthatójával azonos nagyságrendű plexivel van kitöltve (vastagsága 5,7 mm) [*Benedict, 1984*]]. A plexi alatt helyezkedik el vékony rétegben a mérendő folyadék (vastagsága 4,5 mm). Mindkét henger átmérője 30 mm. A plexi és a folyadék tömör rézből készült korongokkal érintkezik. (A réz hővezetési együtthatója több nagyságrenddel nagyobb a mért folyadékoknál) [*Perry, 1968*].



3.8 ábra: Hővezetési együttható mérésére szolgáló berendezés elvi elrendezése.

A folyadékban a hőáramlást elkerülendő az alsó rézkorong az alacsonyabb (T_B) , a felső a magasabb hőmérsékletű (T_A) . (A korábbi sűrűségméréssel megállapítottam, hogy a térfogati hőmérsékleti együttható pozitív, ezzel ebben az elrendezésben a hőáramlás kiküszöbölhető).

A rézkorongok hőmérsékletét ultratermosztátokkal hőcserélők segítségével (a 3.12 és 3.13 ábrán látható kocka alakú részek) tartottam állandó értéken. Az alsó rézkorong hőmérsékletének a szobahőmérséklet alatti hőmérsékleten való tartásához a hőcserélő és rézkorong közé egy Peltier elem helyezhető el [*Boros, 1985*]. Termoelemmel mértem a felső, illetve alsó rézhenger hőmérsékletét, valamint a plexi és folyadék határának hőmérsékletét (T_C). A határfelületen levő termoelem a henger tengelyén helyezkedik el. Az elhelyezés pontosságára való igényt a berendezés matematikai modelljével vizsgáltam. Referenciafolyadéknak desztillált vizet használtam, mivel ennek a hővezetési adatai az irodalomban nagy pontossággal állnak rendelkezésre.

A termoelemek termofeszültségét egy PCL- 812 PG típusú mérőpanellel digitalizáltam. A mérési pontokat a PCLD – 889-es multiplexer kapcsolja a mérőpanelhoz. A mérőpanel vezérlő szoftvere a mellékletben látható. A T típusú termoelem (réz-konstantán) kalibrálása több problémát is felvetett [*Bodry, 1976*]. A mérőkártyához adott kilenced fokú polinommal kapott hőmérsékletek nagy eltérést mutattak. (1-2 0 C). Ezért egy ALMEMO 2290-4 műszerrel (3.9 ábra) és higanyos laborhőmérővel is kalibráltam a hőmérsékletet. A közelítést több módon is elvégeztem.

A termoelemes mérésnél az approximációs polinom a fizikai elvek alapján nem tartalmazhat páratlan fokszámú tagokat [*Seres, 2002*]. A közelítéshez általában a Gauss- féle legkisebb négyzetek módszerét szokták használni. A Gram-Schmidt ortogonalizációval előállítható ortogonális polinomokkal való közelítésnek számítástechnikai előnyei mellett nagy előnye, hogy újabb adatok esetén nem kell a korábbi együtthatókat újraszámolni.



3.9 ábra ALMEMO 2290-4 mérőműszer



3.10 ábra . A mérőberendezés elvi rajza



3.11 ábra. A mérőberendezés az ultratermosztátokkal, és a számítógépes mérőegységgel



3.12 ábra. A szétszedett mérőberendezés



3.13 ábra. A szolárfolyadék tartóhengere és a hőcserélők a mérőberendezésnél.

3.4.2 A mérőkészülék matematikai modellezése

3.4.2.1 A hőtranszportegyenlet hengerszimmetrikus esetben

Ha egy *A* keresztmetszetű, a palástja mentén hőszigetelt henger hossza mentén a hőmérséklet-eloszlást a t_0 időpontban $T(x,t_0)$ függvény írja le, a hőmérsékletkülönbség változásának jellemzésére a

$$\frac{dT(x,t_0)}{dx}$$

differenciálhányadost használhatjuk, a hőáramlás jellemzésére pedig az egységnyi idő alatt a vizsgált keresztmetszeten átlépő hő mennyiségnek a felület egységére eső értékét:

$$\phi = \frac{dQ}{Adt}$$

Az x különböző értékeihez tartozó keresztmetszetek egységnyi felületelemén a t időponttól számított dt idő alatt átáramló hőmennyiség dt-vel elosztott értékét a hőáram t_0 időpontban értelmezett $\phi(x,t_0)$ fluxusának nevezzük. A definícióból következően a ϕ fluxus SI mértékegysége W/m². Tekintsük a fluxust pozitív, értékűnek, ha a hő terjedése x növekedése irányában történik, negatívnak, ha azzal ellentétes irányban.

A fluxus voltaképpen a hőáramlás intenzitását méri a vizsgált helyen. (Ugyanígy *fluxusnak* nevezik a felületegységen időegység alatt átáramló folyadék mennyiségét is, ami a folyadékáramlás helyi intenzitását méri.) Mivel ez az intenzitás annál erősebb, minél nagyobb a hőmérsékletváltozási ráta, ill. a közeg vezetőképessége, a fluxus és a hőmérséklet-eloszlás kapcsolatát kifejező összefüggést a következőképp adhatjuk meg:

$$\varphi(x,t_0) = -\lambda \frac{dT(x,t_0)}{dx},$$

ahol λ [W/mK] dimenziójú szorzó, amelyet a közeg *belső hővezetési* együtthatójának nevezünk. (A negatív előjel azért szükséges a képletben, mert a hő a magasabb hőmérsékletű hely felől az alacsonyabb hőmérsékletű hely irányában terjed.)

Vizsgáljuk meg, hogyan függ a fluxustól a hőmérséklet időben történő változása. Az x és az x+dx koordinátájú keresztmetszetekkel határolt dV = Adx térfogatú térrész hőmérséklete nem változik, ha az x koordinátájú keresztmetszeten belépő hőmennyiség ugyanakkora, mint az x+dx koordinátájú keresztmetszeten át távozó hő mennyisége, feltéve, hogy a dV térfogaton belül nem zajlik hőtermelő vagy hőelnyelő folyamat.

Ha a belépő és a kilépő hőmennyiség különbözik, a különbség a dV térrészbe foglalt anyag hőmérsékletének a megváltoztatására fordítódik. A hőtartalom és a hőmérséklet dT megváltozásának összefüggését ennek megfelelően a következő egyenlet adja:

 $A[\varphi(x+dx,t_0)-\varphi(x,t_0)]dt = Adx\rho cdT.$

-ahol ρ a cella sűrűsége, c a fajhője)

A fluxust a hőmérséklet-eloszlás függvény x szerinti deriváltjával, a megváltozását annak hőmérséklet-eloszlás függvény x szerinti második deriváltjával kifejezve, rendezés után a következő egyenletet kapjuk:

$$-\frac{\lambda}{c\rho}\frac{dT^2(x,t_0)}{dx^2}=\frac{dT(x,t_0)}{dt}.$$

Az egyenlet jobb oldalát a hőmérséklet-eloszlás időben történő változási sebességének értelmezhetjük, a differenciálhányadosok így a kétváltozós T(x,t) függvény parciális deriváltjainak tekinthetők:

$$-\frac{k\lambda}{c\rho}\frac{\partial T^2(x,t)}{\partial x^2}=\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}.$$

Ez az egyenlet a hőszigetelővel körülvett hengerben lejátszódó egyirányú hővezetés differenciálegyenlete.

A térbeli *hőterjedés differenciálegyenletét* ugyanazon az úton kaphatjuk meg, mint amelyet az egyirányú hővezetés fenti vizsgálatánál követtünk, azaz ha felállítjuk egy dV térfogatelembe valamilyen dt idő alatt be-, ill. onnan kiáramló *hőmennyiségek mérlegét*.

A háromdimenziós testekben általános esetben a hővezetés is három dimenzióban zajlik, ezért a leírásához a háromdimenziós vektorok analízisét kell használnunk [*Tyihonov*, 1956].

Ha a belső hőfelszabadulást q-val jelöljük, az alábbi *parciális másodrendű differenciálegyenletre* jutunk:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{c\rho}\Delta T + \frac{q}{c}$$
, ahol

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$
 az ún. Laplace operátor.
Ezt a differenciálegyenletet nevezzük a hővezetés differenciálegyenletének. Ha a belső hőfelszabadulást zérusnak feltételezzük, a fenti differenciálegyenlet az alábbi, ismertebb alakra hozható:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -a^2 \Delta T \,,$$

amelyben az

$$a^2 = \lambda/c\rho$$

[m²/s] dimenziójú mennyiség együtt tartalmazza a vizsgált anyag hővezetésében szerepet játszó anyagállandókat.

Mivel a kísérleti berendezés hengerszimmetrikus, a hővezetés differenciálegyenletének két térdimenziós alakját hengerkoordinátákra transzformálva kapjuk az alábbi egyenletet [*Mises, 1967*]: :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho c_p T \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho c_p r U T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho c_p V T \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

A két térdimenziós feltevés akkor igaz, ha a hengeres geometriájú tartományban lezajló fizikai folyamatok tengely szimmetrikusak. Az egyenletben a baloldal a konvektív hőáramot adja meg, amíg a jobboldal a konduktív, vezetéssel átvitt hő mennyiségét írja le. Az egyenletben ρ a hőátvivő közeg sűrűsége, a c_p a közeg állandó nyomáson vett fajhője, λ a hővezetési együttható, r a sugárirányú és y a függőleges irányú koordinátakomponens. U a sebességvektor sugárirányú és V a sebességvektor függőleges irányú komponense áramló közegek esetén.

Ha a közeg nyugalomban van, vagy szilárdtest, vagy olyan kicsiny sebességek alakulnak ki, amelyek elhanyagolhatóak, akkor a sebességeket az egyenlet baloldalán nullának lehet venni.

U = 0, V = 0.

Ekkor a hő-transzportegyenlet az alábbi alakra egyszerűsödik, ahol a baloldal már csak a hőmérsékletmező időbeli változását leíró tagot tartalmazza.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho c_p T \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

Ez az egyenlet ebben az alakjában egy parabolikus típusú lineáris parciális differenciálegyenlet, amelyet analitikusan is meg lehet oldani nagyon egyszerű

geometriájú és peremfeltételű esetekben. Mivel esetünkben a határfeltételek miatt az analitikus megoldás nem lehetséges, ezért az egyenlet numerikus megoldását végeztem el, esetünkben véges térfogatmódszer segítségével.

3.4.2.2 A hőtranszportegyenlet numerikus megoldása, véges térfogat módszerével

A mérési és a numerikus számítási feladat sematikus képe látható a következő 3.14 ábrán.



3.14 ábra A fizikai és a számítási feladat sematikus ábrája

A numerikus számítások során, mind a ρ sűrűség, mind pedig a c_p fajhő állandó értékű, ami jelentősen egyszerűsíti a numerikus számításokat. A λ hővezetési együttható viszont térben változó mennyiségként lett figyelembe véve a diszkretizálás során, mivel a kísérletekben éppen különböző folyadékok hővezetési együtthatójának a hőmérsékletmező hatására létrejövő változásának vizsgálata a cél. Ezekben a kísérletekben két eltérő hővezetési együtthatójú anyag egymáshoz illesztett hengeres testeiben lezajló hőáramlást vizsgáltam. A 3.15 ábra az egyenlet diszkretizálása során használt rácsokat mutatja. A piros színnel megadott rács illeszkedik a tartomány peremére, a kék színnel megadott rács metszéspontjaiban pedig az ismeretlen, folytonosan differenciálható függvény T(t,r,y) diszkrét értékei helyezkednek el.

A numerikus számítás céljára szimmetria okok miatt elég csak a szimmetriatengely és a külső perem közötti tartományt számítani.



3.15 ábra A diszkretizálás során használt rácsosztás

A *B* index a blue-t jelenti, azaz a kék színű rácsvonalakon elhelyezkedő értékeket kell a képletbe behelyettesíteni, az *R* index, pedig a red-t, azaz piros színű rácspontokról kell az értékeket venni.

$$\frac{\rho c_p T_{B} \overset{k+1}{i,j} - \rho c_p T_{B} \overset{k}{i,j}}{\Delta t} = \frac{1}{r_{Bi}} \left[r_{Ri} \lambda_{Ri} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{r}} \Big|_{Ri} - r_{Ri-1} \lambda_{Ri-1} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{Ri-1} \right] \frac{1}{\Delta r_{Ri-1}} + \left[\lambda_{Rj} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{Rj} - \lambda_{Rj-1} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{Rj-1} \right] \frac{1}{\Delta y_{Rj-1}} \frac$$

$$\frac{\rho c}{p_{B}} \frac{\Delta r_{Ri-1} \Delta y_{Rj-1}}{\Delta t} (T_{B} \frac{k+1}{i,j} - T_{B} \frac{k}{i,j}) = \frac{\Delta y_{Rj-1}}{r_{Bi}} \left[r_{Ri} \lambda_{Ri} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{Ri} - r_{Ri-1} \lambda_{Ri-1} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{Ri-1} \right] + \Delta r_{Ri-1} \left[\lambda_{Rj} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{Rj} - \lambda_{Rj-1} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{Rj-1} \right]$$

$$\frac{\rho c_{p_{B}} \Delta r_{R_{i-1}} \Delta y_{R_{j-1}}}{\Delta t} (T_{B_{i,j}}^{k+1} - T_{B_{i,j}}^{k}) = \frac{\Delta y_{R_{j-1}}}{r_{B_{i}}} \left[r_{R_{i}} \lambda_{R_{i}} \frac{T_{B_{i+1,j}}^{k+1} - T_{B_{i,j}}^{k+1}}{\Delta \mathbf{r}_{B_{i}}} - r_{R_{i-1}} \lambda_{R_{i-1}} \frac{T_{B_{i-1,j}}^{k+1} - T_{B_{i-1,j}}^{k+1}}{\Delta \mathbf{r}_{B_{i-1}}} \right] + \Delta r_{R_{i-1}} \left[\lambda_{R_{j}} \frac{T_{B_{i,j+1}}^{k+1} - T_{B_{i,j}}^{k+1}}{\Delta y_{B_{j}}} - \lambda_{R_{j-1}} \frac{T_{B_{i,j}}^{k+1} - T_{B_{i,j-1}}^{k+1}}{\Delta y_{B_{j-1}}} \right]$$

A fenti egyenletet rendezve egy lineáris egyenletrendszer adódik, amely direkt vagy iterációs módszer segítségével megoldható [*Bahvalov*, 1977]. Mivel a rácsfelbontás növekedése miatt a véges térfogatok száma jelentősen növekszik, ezért az iterációs módszerek alkalmazása a javasolt. Ennek az az egyszerű oka, hogy a rácsfelbontás megduplázása mindkét irányban a véges térfogatok számának négyzetes növekedéséhez vezet, de az ismeretlenekhez tartozó lineáris egyenletrendszer együtthatómátrix elemeinek száma már a negyedik hatvány szerint növekszik [*Bahvalov*, 1977].

Az alábbi egyenletben a *B* indexet az egyszerűbb jelölés miatt elhagyva adódik a diszkretizált parciális differenciálegyenlet numerikus megoldására egy lineáris egyenletrendszer.

$$a_{P}T_{i,j}^{k+1} = a_{N}T_{i,j+1}^{k+1} + a_{S}T_{i,j-1}^{k+1} + a_{E}T_{i+1,j}^{k+1} + a_{W}T_{i-1,j}^{k+1} + S$$

fejlesztett А numerikus probléma megoldására program fenti а egyenletrendszert Gauss Seidel-féle iterációs eljárással [Ralston, 1969] oldja mivel parabolikus típusú egyenleteknél elfogadható sebességű meg. konvergencia tapasztalható még relatíve finomabb rácsok esetén is. (Lásd melléklet)

3.4.2.3 A numerikus számítás eredményei

A numerikus számításokat a mérőberendezésünk geometriai adataihoz illesztettem, ezzel szimulálva a fizikai mérést. Az adatok egy hőmérséklet mátrixban tárolódnak, amelyet a szemléletesség kedvéért MATLAB-bal rajzoltattam ki. A 3.16 és 3.17 ábránál a mérőberendezésem geometriájához hasonló modellel dolgoztam. Az alul levő folyadékréteg vastagsága 90 rácspont (4,5 mm), a felső plexikorong vastagsága 114 rácspont (5,7 mm), a hengerek sugarai 300 rácspont (15 mm). Ebben az esetben Neumann határfeltételeket alkalmaztam minden külső felületnél.

A 3.18 ábránál a henger palástjánál Dirichlet határfeltétellel vizsgáltam, hogy a henger palástjának a hőmérséklete hogyan hatol a hengerbe.

Az ábrákon is jól látható, hogy a két réteg határán, a tengely közelében sugárirányban (ahová a termoelemet helyeztem), a hőmérséklet nem változik. Természetesen az eredmény algebrai elemzése is ezt igazolja. Ezzel a matematikai modellel bizonyítottam, hogy a középső mérési pont helye az adott geometriánál sugárirányban néhány millimétert eltérhet, nem befolyásolva az eredményt.



3.16 ábra Hőmérséklet eloszlás a mérőberendezés matematikai modelljében



3.17 ábra Hőmérséklet eloszlás a mérőberendezés matematikai modelljében



3.18 ábra Hőmérséklet eloszlás a mérőberendezés matematikai modelljében Dirichlet határfeltétellel.

3.4.3 A hővezetési együttható mérési elmélete

A hővezetés Fourier törvényéből [Hütte, 1993] következik, hogy

(1)
$$T_{A}-T_{C}=\Phi^{*}R_{p},$$

 T_A , T_B , T_C a korábban leírt hőmérsékletek , Φ a hőáram és R_p a plexi termikus ellenállása, amelyet az R=d_p/\lambda_pA összefüggéssel számolunk, ahol

d_p-a plexi vastagsága,

A - a plexi és a folyadék keresztmetszete és

 λ_p - a plexi hővezetési együtthatója.

A hőáram értéke a desztillált vízzel történő méréskor

(2)
$$\Phi = (T_A - T_B)/(R + R_v)$$

Ezt (1)-be beírva és R_v - a desztillált víz termikus ellenállását behelyettesítve a kapott egyenletből a desztillált víz hővezetési együtthatója kifejezhető:

(3)
$$\lambda_{\nu} = \frac{d_{\nu}}{d_{p}} \frac{(T_{A} - T_{C})}{(T_{C} - T_{B})} \lambda_{p},$$

ahol

d_v- a desztillált víz rétegvastagsága és

 $\lambda_v - a víz hővezetési együtthatója.$

Hasonlóan a szolárfolyadék mérésénél levezethető, hogy

(4)
$$\lambda_x = \frac{d_x}{d_p} \frac{(T_{AX} - T_{CX})}{(T_{CX} - T_{BX})} \lambda_p,$$

ahol a hőmérsékletek jelölése értelemszerűen megfelel a víznél használt jelölésekkel, λ_x - a szolárfolyadék meghatározandó hővezetési együtthatója és d_x a szolárfolyadék rétegvastagsága, ami természetesen egyenlő d_v-vel. (3) és (4) egymással való osztásából kapjuk:

(5)
$$\lambda_{x} = \frac{(T_{AX} - T_{CX})}{(T_{CX} - T_{BX})} \frac{(T_{C} - T_{B})}{(T_{A} - T_{C})} \lambda_{v}$$

3.5 A szolárfolyadék fajhőjének mérése

2.5.1 A mérőberendezés

A szolárfolyadék fajhőjét kaloriméterrel mértem desztillált vízzel való relatív módszerrel. A kaloriméterben levő folyadékot elektromos patronnal melegítettem és mértem a hőmérséklet időtől való függését. A hőmérséklet méréshez a hővezetésnél is használt termoelemes mérőrendszert használtam. A kaloriméter, valamint a benne levő kiegészítő berendezések - fűtőpatron, keverő, termoelem – tömege és fajhője ismeretlen, praktikusan mérhetetlen, ezért az abszolút mérés helyett a relatív mérést választottam, amelynél az előbbi alkatrészek fizikai paramétereire nincs szükség. Standard anyagnak a desztillált vizet választottam, melynek hőtechnikai adatai nagy pontossággal állnak rendelkezésünkre.



3.19 ábra Kaloriméter sematikus rajza

A kaloriméterben levő vízre melegítéskor a következő kalorimetrikus egyenlet érvényes:

$$c_v(m_v + M)(T - T_{0v}) = U_v I_v t$$
, ahol

 m_v , c_v - a desztillált víz tömege és fajhője

M – a kaloriméter vízértéke

t – az idő

 U_v , és I_v a fűtőpatron feszültsége és áramerőssége

T és T_{0v} - a víz hőmérséklete és kezdeti hőmérséklete

Ebből látható, hogy a hőmérséklet időbeli függvénye lineáris, melynek meredekségét (a_v) mérve a kaloriméter vízértéke számolható.

$$T = \frac{U_{v}I_{v}}{c_{v}(m_{v} + M)}t + T_{0v} \qquad a_{v} = \frac{U_{v}I_{v}}{c_{v}(m_{v} + M)} = tg\alpha_{v}$$

$$M = \frac{U_v I_v}{a_v c_v} - m_v$$

Hasonlóan a szolárfolyadékra is felírhatjuk a megfelelő kalorimetrikus egyenletet. (az x index a szolárfolyadékra vonatkozik).

. .

$$(c_x m_x + c_v M)(T - T_{0x}) = U_x I_x t$$

$$T = \frac{U_x I_x}{c_x m_x + c_x M} t + T_{0x} \qquad a_x = \frac{U_x I_x}{c_x m_x + c_x M} = tg\alpha_x$$

A kaloriméter előbb kiszámolt vízértékét beírva a mérendő szolárfolyadék fajhője kifejezhető.

$$c_x = \frac{U_x I_x}{m_x a_x} - \frac{U_v I_v}{m_x a_v} + m_v c_v$$



3.20 ábra Mérőberendezés a fajhő meghatározásához.

3.6 A szolárfolyadék törésmutatójának mérése

A szolárfolyadék hígítási arányának nagyon pontos meghatározására a folyadék törésmutatójának mérését célszerű használni. A gyakorlatban kézi refraktométerrel való törésmutató méréssel szokták az etilénglikol-víz keverék fagyáspontját is meghatározni, de ezek a készülékek célkészülékek és nem a törésmutató abszolút értékét mérik, hanem eleve a fagyáspontra vannak kalibrálva, természetesen etilénglikol oldatra.

A következőkben meghatároztam a propilénglikol vizes oldatának optikai törésmutatóját (Levegőre való relatív törésmutatóját). A méréshez laboratóriumi Abbe-féle refraktométert használtam, amely a totális reflexió határszögének meghatározása alapján igen pontos törésmutató mérést tesz lehetővé. A készülékkel 1,3 és 1,7 közötti értékekre lehet folyadékok törésmutatóját meghatározni 0,2% pontossággal.



3.21 ábra Abbe-féle refraktométer

A törésmutató meghatározás egyik fontos eszköze az Abbe-féle refraktométer [*Budó*, 1980]. A refraktométer két prizmája közé cseppentett folyadék a prizmák összezárása után plánparalel réteget képez. A vizsgált folyadék törésmutatója kisebb a prizmák törésmutatójánál. Az egyik prizmára monokromatikus fényt bocsájtunk. A másik prizmára már csak a teljes visszaverődés szögével, vagy annál kisebb szöggel érkező fénysugarak jutnak, amelyeket távcső segítségével skálázott okulárra irányítunk. Az okulár skálája élesen elhatárolt világos és sötét részekből áll. A határvonal a teljes visszaverődés szögének felel meg. A skála a törésmutató értékét mutatja



3.22 ábra Az Abbe-féle refraktométer vázlata

Mivel legtöbbször napfényt vagy izzólámpa fényét használjuk a méréskor, a refraktométerbe kevert fény jut. A diszperzió jelensége miatt a különféle hullámhosszú fényalkotókra a törésmutató is különböző. Több hullámhosszból álló sugárzás esetén a színek a prizmán színképpé bomlanak, a mérésnél a határvonal elmosódott lenne. Ezért a tárgylencse és a mérőprizma közé egy egyenes állású, állítható *Amici-prizmapár*-t szereltek [*Bárány, 1951*]. A prizmarendszer mozgatásával a határvonalat élesre állíthatjuk. A prizmapár csak egy hullámhosszú fényt, a hélium 587,6 nm-es hullámhosszú fényt engedi át. A műszer így bármilyen megvilágításnál a hélium 587,6 nm hullámhosszán mért törésmutatót kapjuk.

A mérés külön előnye, hogy praktikusan pár csepp folyadékkal elvégezhető. A hígítási arányt sűrűségméréssel is meg lehet határozni, de ehhez viszonylag nagyobb mennyiségű folyadék szükséges és a mérési pontossága is kisebb. Az Abbe refraktométerbe temperált folyadék vezethető, ezáltal a törésmutató hőmérsékletfüggése is mérhető.

4. A SZOLÁRFOLYADÉK PARAMÉTEREIRE VONATKOZÓ EREDMÉNYEK

4.1 Viszkozitásmérés eredmények Rheotest és Höppler viszkoziméterrel

Természetesen a szolárfolyadék mérésének kiértékelésénél felhasználtam a Rheotest 2.1 műszerhez készített kiértékelő szoftvert. A kapott folyási görbe linearitása alapján látható (4.1 ábra), hogy a *szolárfolyadék newtoni folyadéknak* tekinthető. Ez a tény azért fontos, mert a szolárfolyadék vizes oldatának vizsgálata a Rheotest viszkoziméterrel a magasabb hőmérsékleteknél levő viszonylag kis viszkozitás értékek miatt nehézkes, azonban éppen a folyadék newtoni jellege miatt a kényelmesebben kezelhető Höppler viszkoziméter is használható viszkozitás mérésre.

A következőkben Höppler viszkoziméterrel mértem a szolárfolyadék dinamikai viszkozitását a hőmérséklet függvényében.

A dinamikai viszkozitás méréseket 100%-os (tömény), 75%-os, 50%-os, 30%és 10%-os hígítású szolárfolyadékokkal végeztem. A sok mérés közül tipikus mérési eredmények láthatók: a tömény szolárfolyadék (4.2 ábra) és az általában használt 50%-os szolárfolyadék-víz oldat (4.3 ábra) dinamikai viszkozitásának hőmérsékletfüggése.



4.1 ábra Tömény szolárfolyadék folyási görbéje 26 °C-on.



4.2 ábra Tömény szolárfolyadék dinamikai viszkozitása



4.3 ábra 50%-os szolárfolyadék dinamikai viszkozitása a hőmérséklet függvényében

4.1.1. A viszkozitás mérési eredmények értékelése

A mért viszkozitási értékeket vizsgálva megállapítható, hogy a normál üzemi hőmérséklet tartományban is jelentős a folyadék dinamikai viszkozitásának változása. A mért viszkozitás értékeket összevetettem a desztillált víz viszkozitás értékével [*Weast, 1982*]. A könnyebb értékeléshez ábrázoltam az 50%-os szolárfolyadék-vizes oldatának dinamikai viszkozitásának arányát a vízhez viszonyítva a hőmérséklet függvényében (4.5 ábra). Látható, hogy a normál üzemi hőmérsékletnél a propilénglikol 50%-os vizes oldata kb. négyszer viszkózusabb a víznél. Mivel a folyadék sűrűsége jóval kisebb

mértékben változik, ezért ez az arány a kinematikai viszkozitásnál ($v=\eta/\rho$) is fennáll. Ez elsősorban a Reynolds számnál lényeges, amely meghatározó jellegű a kollektor folyadék áramlási viszonyainál.



4.4 ábra Víz dinamikai viszkozitása a hőmérséklet függvényében



4.5 ábra Viszkozitási arány $(\eta_{prop}/\eta_{víz})$ hőmérsékletfüggése

4.1.2. A szolárfolyadék viszkozitását meghatározó függvény

Mivel áramlástani szempontból az egyik legmeghatározóbb anyagi paraméter a viszkozitás, ezért a szolárfolyadék viszkozitását ismerni kell a hőmérséklet és a hígítás függvényében a korrekt tervezés céljából. A mérések alapján kétféle közelítést is alkalmaztam.

Egyrészt az irodalom alapján a folyadékok viszkozitásának hőmérséklet függésére jól alkalmazható az ARRHENIUS - ANDRADE - GUZMAN egyenlet [*Perry*, 1968]:

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{E}{RT}}$$

Ahol E- az ún. viszkozitási aktiválási energia, R az egyetemes gázállandó, T az abszolút hőmérséklet. E és η_0 az adott folyadékra jellemző állandók.

Mindkét oldalt logaritmálva látható, hogy a viszkozitás logaritmusát az abszolút hőmérséklet reciprokának függvényében ábrázolva egyenest kapunk.

$$\ln \eta = \frac{E}{R} \frac{1}{T} + \ln \eta_0$$

Az egyenes meredekségéből az aktiválási energia kiszámítható. A korábban írt hígításokra kiszámoltam a mérési adatokból az egyenes egyenletét. A következő ábrákon és táblázatban láthatók az eredmények. Egyrészt a tömény szolárfolyadék (lényegében propilénglikol) esetén, ami elsősorban elvi szempontból fontos (4.6 ábra), másrészt a gyakorlatban legtöbbször használt 50%-os hígításnál (4.7 ábra).



4.6 ábra. Tömény szolárfolyadék viszkozitásának függése a hőmérséklet reciprokától



4.7 ábra 50%-os hígítású szolárfolyadék viszkozitásának függése a hőmérséklet reciprokától

A tömény szolárfolyadékra (propilénglikol):

$$\eta_{100} = 2,0071 \cdot 10^{-8} e^{\frac{4354,7}{T}}$$

Az 50%-os hígítású szolárfolyadékra:

$$\eta_{50} = 5,5295 \cdot 10^{-7} e^{\frac{2728,7}{T}}$$

A kapott viszkozitási aktivációs energiák értékei a tömény szolárfolyadéknál és az 50%-os hígítású szolárfolyadékra:

E_{100} = 36,19 kJ/mol

E₅₀=22,67 kJ/mol.

Ezzel igazoltam, hogy a propilénglikolra (és vizes oldatára is) érvényes az ARRHENIUS - ANDRADE – GUZMAN egyenlet, egyúttal a propilénglikol aktivációs energiáját is meghatároztam.

Ahhoz, hogy egy általánosan használható összefüggést kapjunk a szolárfolyadék viszkozitására, kiszámoltam az aktivációs energiákat és az Arrhenius-Andrade-Guzman egyenletben szereplő η_0 értékét a mért hígításoknál (α).

Hígítás				
(%)	A=ER	$B=ln(\eta_0)$	η_0	E
0	1849,7	-13,186	1,87671E-06	15371,01
25	2196,3	-13,633	1,20024E-06	18251,25
50	2728,7	-14,408	5,52954E-07	22675,5
75	3450,1	-15,812	1,35813E-07	28670,33
100	4354,7	-17,724	2,0071E-08	36187,56

4.1 táblázat Az Arrhenius-Andrade-Guzman egyenlet együtthatói

Az így kapott együtthatókra másodfokú polinomokat illesztettem. Ezekkel az együtthatókkal a szolárfolyadék viszkozitása:

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{E}{RT}}$$

E=12394 α^2 +8427,1 α +15370 η_0 =2 10⁻⁶ α^2 -3 10⁻⁶ α +2 10⁻⁶

 $[\eta_0] = [\eta] = Pas$, $[\alpha] = 1$, [E] = J/mol, R = 8,31 J/mol K, hígítás foka: $0 < \alpha < 1$

A kapott összefüggés közelítésének pontosságának megállapításához α =0,5-re (50%-os hígítás), 72,2 °C-ra kiszámolva a viszkozitást η =1,49 mPas-ot kaptam. Ez a mért 1,44 mPas értéktől 3,4%-kal tér el.

4.1.3. Polinomiális közelítés a szolárfolyadék viszkozitására

A mérési értékekre a Gauss-féle legkisebb négyzetek módszerével másodrendű polinomokat illesztettem. Ezzel a gyakorlat számára az előzőeknél praktikusabb (egyszerűbb) függvényeket készítettem. Az így kapott hőmérsékletfüggéseket a 4.2 táblázat tartalmazza. Az illeszkedés jóságát mutató determinációs együtthatót is kiszámoltam. Az egyenletek SI rendszerben értendők. A hőmérsékletek celziusz fokban, a viszkozitások mPas-ban értendők.

	viszkozitás hőmérséklet	korr.
hígítás (%)	függése	együttható
0	η =0,0002 t ² -0,0325 t + 1,6692	$R^2=0,9795$
25	$\eta = 0,0006 t^2 - 0,0934 t + 4,2644$	$R^2=0,9885$
50	η =0,0015 t ² -0,2421 t + 10,768	$R^2=0,9767$
75	$\eta = 0,0056 t^2 - 0,8012 t + 30,687$	$R^2 = 0,9855$
100	$\eta = 0,0153 t^2 - 2,4413 t + 99,151$	$R^2 = 0,9608$

4.2 táblázat Viszkozitás hőmérsékletfüggése különböző hígításoknál

A mért hígításoknál egy közös grafikonon ábrázoltam a szolárfolyadék viszkozitását a hőmérséklet függvényében. (4.8 ábra)



4.8 ábra. Különböző hígítású szolárfolyadékok viszkozitásának hőmérsékletfüggése

A 4.2 táblázatban a polinomok megfelelő együtthatói a hígítás (α) függvényei. Ennek a függvénynek a közelítésére szintén egy másodfokú polinomot választottam. Ezt a közelítést alkalmazva a fenti összefüggésekben az együtthatókra, egyesített összefüggést kaptam a szolárfolyadék viszkozitására a hőmérséklet és hígítás függvényében (4.3 táblázat).

$$\eta(\alpha,t) = A_{\eta}(\alpha) \cdot t^2 + B_{\eta}(\alpha) \cdot t + C_{\eta}(\alpha),$$

Együttható	együttható hígításfüggése	determinációs együttható	
$A_{\eta}(\alpha)$	$= 0,0249 \alpha^2 - 0,0108 \alpha + 0,0007$	$R^2 = 0,9795$	
$B_{\eta}(\alpha)$	$= -4,0786 \alpha^2 + 1,8685 \alpha - 0,1268$	$R^2=0,9885$	
$C_{\eta}(\alpha)$	$= 165,89 \alpha^2 - 77,335 \alpha + 5,7668$	$R^2=0,9767$	
α - a hígítás mértéke. Az összefüggésben 0< α <1, (α =0 : víz)			

4.3 táblázat Viszkozitási együtthatók a hígítás függvényében

A közelítés pontosságának vizsgálatához egy tipikus, mért hígítású esetre kiszámoltam a viszkozitást. A fenti összefüggéssel az 50%-os szolárfolyadék (α =0.5) együtthatói:

 $\begin{array}{l} A_{\eta}(0.5) = 1,525 \ 10^{-3} \ mPas/^{o}C^{2} \\ B_{\eta}(0.5) = 0,2122 \ mPas/^{o}C \\ C_{\eta}(0.5) = 8,5718 \ mPas \end{array}$

Ezekkel a viszkozitás 72,2 °C-on:1,35 mPas. Ez a mért 1,44 mPas értéktől 6,2 %-kal különbözik. Látható, hogy ez a polinomiális összefüggés kissé pontatlanabb, mint az előbbi exponenciális közelítés. A mérnöki gyakorlatban azonban a hibának ez a mértéke is elfogadható és a polinomiális összefüggés egy viszonylag egyszerűbb formalizmus.

4.2 A sűrűségmérés eredményei



4.9 ábra Szolárfolyadék sűrűsége a hígítás függvényében 20 °C- on

A mérési adatokra illesztett másodfokú polinom az R^2 determinációs együtthatóból is láthatóan jó közelítés.

A sűrűség hígítástól (α) való függése (20 °-on):

$$\rho_{(\alpha)} = -66,892 \ \alpha^2 + 117,2\alpha + 999,06$$
,

Látható, hogy az egész tartományban a hígítástól függő sűrűség változása kb. 5 %-os.

Nagyon érdekes, hogy a sűrűség a 90% - 100% -os intervallumban a várttól eltérően csökkent. A jelenséget valószínűleg a víz hidrogénkötései okozzák.

A folyadék hőmérséklettől függő térfogatváltozása a minket érdeklő kb. 20 °C - 100° C hőmérséklet tartományban lineárisnak tekinthető.

A köbös hőtágulási együttható és sűrűség közti kapcsolathoz tudjuk, hogy

V=V₀ (1+ $\beta \Delta t$), tehát $\rho=m/V=m_0/V_0(1+\beta \Delta t)=\rho_0(1-\beta \Delta t)$

Itt felhasználtuk, hogy m=m₀ és $\beta <<1$ miatt az $1/(1 + \beta \Delta t)$ sorfejtésénél az elsőrendű tagnál megállhatunk, hiszen β^2 másodrendben kicsi. (praktikusan folyadékoknál 10⁻⁸ nagyságrendű).

20 °C -nál és 80 °C -nál megmérve a tömény szolárfolyadék sűrűségét (1050 kg/m³és 995 kg/m³).

Ezekből: $\beta = 8,73 \ 10^{-4} \ 1/$ °C.

Kiszámítva a 0 °C-nál a tömény szolárfolyadék sűrűségét:

 $\rho_{(20)} = \rho_{(0)} (1 + \beta 20) = 1068,3 \text{ kg/m}^3$

Ezzel a tömény szolárfolyadék sűrűsége a hőmérséklet függvényében:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta t) = 1068,3 (1 - 8,73 \ 10^{-4} t)$$

ahol t a hőmérséklet °C-ban, és $[\rho]=kg/m^3$

4.3 A hővezetési együttható mérési eredményei

A 3.10 ábrán a hővezetés mérésre egy tipikus mérési eredmény látható. A hővezetés mérésnél kb. 10 perc alatt beáll a stacioner állapot. A hőmérsékletet másodpercenként mértem. A közbülső hőmérséklet aszimptotikusan tart a stacioner hőmérsékleti értékhez ($\Delta t < 0.1$ °C).



4.10 ábra: Tipikus hőmérséklet értékek az idő függvényében a hővezetési együttható mérésénél

A méréseknél λ_{viz} =0,5873 W/mK értékkel számolva a tömény szolárfolyadék hővezetési együtthatójára 0,2227 W/mK – t kaptam (50. °C –on). A referenciának választott víz hővezetési együtthatója 0 °C és 100 °C között kb

18%-kal változik [*Raznjevic, 1964*]. További mérések szükségesek, hogy a szolárfolyadék hővezetési együtthatójának hőmérsékletfüggését is figyelembe lehessen venni a tervezésnél. A víznél kisebb hővezetési együttható természetesen a hőátadás szempontjából a tiszta víz hőhordozóhoz képest kedvezőtlenebb.

Különböző hígításoknál mértem a szolárfolyadék hővezetési együtthatóját. A kapott eredményeket a 4.4. táblázat tartalmazza

Hígítási arány	Hővezetési
(%)	együttható
	(W/mK)
10	0,555
30	0,483
50	0,3837
75	0,296
100 (tömény)	0,2227

4.4 táblázat . Hővezetési együttható függése a hígítástól

A hígítási arány függvényében a hővezetési együttható jó közelítéssel ($R^2=0,9947$) lineáris függvénnyel közelíthető.

 $\lambda = -0,3766 \alpha + 0,5876$

$$[\lambda]=W/mK,$$
 0< α <1



4.11 ábra Hővezetési együttható függése a hígítástól

4.4 A fajhőmérés eredményei



4.12 ábra Tipikus mérési eredmény a desztillált víz melegítésekor



4.13 ábra Tipikus mérési eredmény a szolárfolyadék melegítésekor



4.14 ábra Szolárfolyadék fajhője a hígítás függvényében

A méréseket 10%, 30%, 50%, 75%, 100%-os hígítású szolárfolyadékokkal végeztem el. Az eredmények összesített grafikonja a 4.14 ábrán látható. A hígítási arány függvényében a szolárfolyadék fajhője:

$$c = -19,643a + 4176,4,$$

ahol α a hígítási arány (0< α <1), c a szolárfolyadék fajhője

4.5 A törésmutató mérés eredményei





4.15 ábra Szolárfolyadék vizes oldatának törésmutatója a hígítási arány függvényében (20°C-on).

A 4.16 ábrán látható és a determinációs együtthatóból ($R^2=0,9947$) megállapítható hogy az optikai törésmutató első közelítésben lineárisan változik a hígítási aránnyal.

A 4.16 ábra az 50%-os hígítású szolárfolyadék törésmutatóját ábrázolja a hőmérséklet függvényében. A többi hígításnál is hasonló jellegű adatokat kaptam, amelyek lineárisan közelíthetők.



4.16 ábra Szolárfolyadék törésmutatójának hőmérsékletfüggése

A 4.5 táblázat a törésmutató függvényeket tartalmazza a hőmérséklet függvényében különböző hígítású arányokra.

0%	n=-0,00016 t + 1,3364
25%	n=-0,00024 t + 1,3652
50%	n=-0,00029 t + 1,3952
75%	n=-0,000315 t + 1,4151
100%	n=-0,00032 t + 1,4365

4.5 táblázat Törésmutató függése a hígítástól

A törésmutató- hőmérséklet függvények általános alakja:

$n = A_n t + B_n$

ahol t a hőmérséklet °C –ban, az A_n és B_n együtthatók a 4.5 táblázatból kiolvashatók. Ahhoz, hogy egy univerzális összefüggést készítsünk, ábrázoltam az együtthatókat a hígítás függvényében.



4.17 ábra Az A együttható függése a hígítástól





Ezzel a törésmutatóra a következő összefüggést kaptam:

n = A_n(
$$\alpha$$
) t + B_n(α), ahol
A_n(α) = -0,0002 α^2 -0,0004 α - 0,0002 és
B_n(α) = 0,1 α + 1,3397

Mivel leggyakrabban szobahőmérsékleten mérünk, 20 °C-ra

n=- 0,004
$$(\alpha + 1)^2$$
 t + 0,1 α + 1,3397

A függvényt ábrázolva látható, hogy linearizálható a $0 \le \alpha \le 1$ tartományban.



4.19 ábra Szolárfolyadék törésmutatója a hígítás függvényében, 20°C-on Ezzel a 20°C-os szolárfolyadék oldatokra a hígítás függvényében kaptam a törésmutató értékét:

$n = 0,1033 \alpha + 1,3347$

50% ($\alpha = 0.5$), n = 1.389, számított 1.3864 (0.2%-os közelítési hiba)

5. A FOLYADÉKOS NAPKOLLEKTOR ÁRAMLÁSI VISZONYAI

5.1 Az SKV típusú folyadékos napkollektor

5.1.1 Lamináris turbulens átmenet a kollektorban



5.1 ábra. Az SKV folyadékos napkollektor képe



5.2 ábra Az SKV folyadékos napkollektor fontosabb méretei (mm-ben) [Fiorentini, 2000]

A napkollektorból az abszorbensen elnyelt hőt a 6 db 60 mm² keresztmetszeten áramló szolárfolyadék viszi el. A napkollektor a 20 m-re levő bojlerrel 18x1 mm-es rézcsővel van összekötve. A számítások során a csöveket hidraulikailag simának vettem [*Bobok, 1987*] és elsősorban a lamináristurbulens átmenetre voltam kíváncsi. Külön számítottam a napkollektorhoz vezető cső hidraulikai ellenállását és a napkollektor hidraulikai ellenállását. Lamináris áramlás esetén (Reynolds szám < 2320) [*Landau, 1980*] a klasszikus:

$$\Delta p = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \text{ összefüggéssel,}$$

illetve turbulens esetben a

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2$$

formulával számoltam és a $\lambda = 0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$ Blasius féle csősúrlódási tényezőt használtam [*Sitkei, 1997*], ahol

- Δp- a nyomáskülönbség a cső két vége között
- l, d- a cső hossza illetve átmérője
- ρ-a folyadék sűrűsége
- η- a folyadék dinamikai viszkozitása
- v- a folyadék átlagsebessége
- Re = $\frac{vd\rho}{\eta}$ a Reynolds szám

Számoltam a kollektoron, illetve a hozzávezető csőnél a nyomáseséseket a térfogatáram (hozam) függvényében. Mindkét esetben használtam az általam mért viszkozitási eredményeket, és ezekkel vízre és 50 °C-os 50%-os propilénglikol-víz keverékre számoltam. A számolást az iteráció miatt numerikus módszerrel végeztem. A Reynolds szám a hozamtól függ, a hozam viszont függ a Reynolds számtól. A Reynolds számtól pedig az áramlás jellege függ (lamináris vagy turbulens), eszerint kell a fenti összefüggések közül választani.

A lamináris-turbulens átmenet a csöveknél a belépési pont utáni ún. tranziens szakasz után értendő. Ennek értéke [*Bohl, 1983*]

lamináris esetben:	$L_t = C_l \cdot Re \cdot d$,	, ahol C _l =0,06	0,029
turbulens esetben:	$L_t = C_t \cdot d$,ahol C _t =50	100

A kollektor geometriai adatait használva ennek értéke kb. 50 cm a gyűjtőcsövek belépési pontjától számítva.



Az eredmények a 5.3 ábrán illetve 5.4 ábrán láthatók.

5.3 ábra A napkollekrorra számított nyomásesés függése a hozamtól





5.1.2 A számítási eredmények értékelése

A 5.3 és 5.4 ábrán jól látható hogy a lamináris-turbulens átmenet mekkora térfogatáramoknál következik be. Csak a napkollektort vizsgálva, vízre számolva 0,1 liter/s-tól, szolárfolyadéknál 0,2 liter/s-tól válik turbulenssé az áramlás. A napkollektorhoz vezető csőnél a turbulencia előbb következik be (szolárfolyadékra 0,05 liter/s), mint a kollektornál. Annak ellenére, hogy a turbulens áramlásnál nagyobb energia befektetésre van szükség (szivattyú), a kollektornál levő hőkonvekció miatt azonban a kollektorban a turbulens áramlás hőtechnikailag kedvezőbb [*Cumo, 2000*]. A hőátadás lamináris esetben hővezetéssel, turbulens áramlás esetén hőáramlással valósul meg, ezért a térfogatáramot célszerű ezen szempontok alapján beállítani.

5.1.3 ANSYS programmal számolt áramlás

Az ANSYS 10-es és 11-es verziójú program csomagjával modelleztem egy napkollektort. Különböző sebességeknél jól látható a lamináris beállási szakasz változása. Az 5.5 ábrán (v_{max} =4,152 m/s) a kollektorcsövek felső felén sem lamináris az áramlás. Az 5.6 ábrán (v_{max} =0,157 m/s) a függőleges kollektor csövekben látható a kis Reynolds-szám miatt a lamináris áramlási kép. Az 5.7 ábrán (ANSYS 11.0) az osztócsőből kilépő folyadék áramlási sebességképét láthatjuk. Jól látható, hogy a viszonylag kis sebesség mellett is kb. 10 sugárnyi beállási hossz kell a lamináris profil kialakulásához.



5.5 ábra A hőhordozó közeg ANSYS programmal számolt sebességeloszlása



5.6 ábra A hőhordozó közeg ANSYS programmal számolt sebességeloszlása



5.7 ábra A hőhordozó közeg ANSYS programmal számolt sebességeloszlása

6. A FOLYADÉKOS NAPKOLLEKTOR ÜZEMELTETÉSE

6.1 A szolárfolyadék paramétereinek hatása a napkollektor üzemeltetésére

A folyadékos napkollektorra felírhatjuk a hőmérlegre vonatkozó egyenletet. *[Buzás, 2009*]. Az egyenlet baloldalán a napkollektor hőtartalmának növekedése, a jobb oldalon a beeső napsugárzás, a napkollektor hővesztesége és a folyadék tömegáramlása miatti hőelvitel van.

$$\rho_f c_f V_f \frac{dT_{ki}}{dt} = I_k A_k \eta_0 - U_L A_k \left(T_{\acute{a}tl} - T_{k\"{o}rny} \right) + \frac{dm}{dt} c_f \left(T_{be} - T_{ki} \right),$$

ahol

 $\rho_f, c_f, V_f, m-a$ folyadék sűrűsége, fajhője, térfogata és tömege

 I_k – a kollektorra eső napsugárzás intenzitása,

 η_0 – az optikai hatásfok,

U_L – a teljes hőveszteségi tényező,

 T_{be} , T_{ki} , T_{korny} a belépő és kilépő folyadék hőmérséklete, illetve a környezet hőmérséklete,

T_{atl} a folyadék átlagos hőmérséklete.

Stacioner esetben (a bal oldal értéke nulla), a kilépő folyadék hőmérsékletére kapjuk:

$$T_{ki} = \frac{A_k \eta_0}{q_f \rho_f c_f} I_k + T_{be}$$

A kimenő folyadékhőmérsékletet $A_k=2$ m² –rel, $I_k=200$ W/m²-rel, $q=2\cdot10^{-5}$ m³/s–mal számolva $T_{be}=20$ °C-nál a következő értékeket kapjuk a szolárfolyadék százalékos hígításának függvényében.



6.1 ábra Szolárfolyadék kilépő hőmérséklete a hígítás függvényében

6.2 Az üzemeltetés hatása a szolárfolyadékra

A napkollektorok hosszabb üzemeltetése után az amúgy átlátszó szolárfolyadék megbarnulását tapasztalhatjuk. Vizsgálatom célja a megbarnulás okának kiderítése. Két év óta üzemelő napkollektorból származó szolárfolyadékot vizsgáltam. Először FEK-56M típusú fotokoloriméterrel (6.2 és 6.3 ábra) mértem a használt szolárfolvadék fényelnyelését a fény hullámhosszának függvényében. Ez a fotokoloriméter egy kétsugaras koloriméter, melynél a mérés lényege, hogy az egyik fénysugár útjába helyezzük küvettában a vizsgált folyadékot és fotodetektorokkal mérjük a két fénysugár intenzitását. Az akadálytalan fénysugár intenzitásának csökkentésével elérhetjük, hogy a két intenzitás egyenlő legyen. A szűkítés mértéke arányos a küvettában levő kolorimetrikus tulajdonságával. А méréseket különböző folyadék színszűrőkkel, 9 hullámhosszon lehet elvégezni. Az abszorbciónál érvényes a Lambert-Beer törvény, mely szerint

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-\alpha x} \; \; , \qquad$$

ahol α a koncentrációval arányos. (Az elnyelés logaritmusát szokás extinciónak nevezni)



6.2 ábra FEK-56M típusú fotokoloriméter


- Fényforrás
 Színszűrők
- 3. Prizma
- 7. és 10. A fényáram szabályozása
- 4. Tükör
- 5. Lencse
- 6. Küvetta
- 9. és 11. Fotodetektor

6.3 ábra Az FEK-56M fotokoloriméter elvi rajza

Ezután Carlston laboratóriumi szűrővel (6.4 ábra), 0,45 µm-es nuclepore szűrőfelülettel (6.5 ábrán a szűrt görbe), majd mélységi szűrővel [*Czirfusz*, 1966] másodszor is megszűrtem a folyadékot.



6.4 ábra Laboratóriumi folyadékszűrő

Az így szűrt folyadék elnyelési görbéje az 6.5 ábra "kétszer szűrt" görbéje. Ha ezeket az elnyelési görbéket összevetjük a 6.6 ábra elnyelési görbéivel, amelyen a használatlan szolárfolyadék fényelnyelései látszanak, különböző töménységeknél, akkor a következőket állapíthatjuk meg:

- A szűrés hatására a folyadék átlátszóbbá vált (minden hullámhosszon), azaz a kiszűrt részecskék mérete 0,4 μm nagyságrendű, ami korróziós termékekre utal. A korróziós termékek csőfalra való kiülepedését a következőkben matematikailag modelleztem.
- 2. Mivel a második szűrés sem tette teljesen átlátszóvá a szolárfolyadékot, ebből arra következtettem, hogy a korróziótól független hatás is szerepet játszik az elszíneződésben.
- 3. A 6.5 ábra elnyelési görbéit vizsgálva láthatjuk, hogy az elnyelés az alacsonyabb hullámhosszok felé nagyobb (kék színnél). Ez magyarázza a használt folyadék sárgás-barna színét. A színkör (6.7 ábra) alapján látható, hogy a sárgás-barna szín (kb. "2 óránál") a kék színnek (kb. "8 óránál") a komplementer színe, azaz a fehér fényből a kékesebb színek elnyelődése után látjuk a folyadékot sárgás-barnának.



6.5 ábra Fényabszorbció a hullámhossz függvényében, használt szolárfolyadékra kétszeres szűrés esetén



6.6 ábra Fényabszorbció a hullámhossz függvényében, tiszta szolárfolyadéknál



6.7 ábra Színkör

4. A korróziós termékektől független elszíneződést a tömény szolárfolyadék hevítésével szimuláltam. Nyomás alatt hevítettem a szolárfolyadékot (1 órán át), és a feltételezésnek megfelelően a folyadék megbarnulását tapasztaltam. A 6.9 ábrán a hevített és tiszta szolárfolyadék fényelnyelését láthatjuk. A 6.10 ábrán a tiszta és hevített elnyelés közti különbséget ábrázoltam. Látható, hogy az alacsonyabb hullámhossz tartományban nagyobb mértékű az elnyelés.



6.8 ábra Tömény szolárfolyadék hevítése



6.9 ábra Fényabszorbció a hullámhossz függvényében, tiszta és hevített, tömény szolárfolyadéknál



6.10 ábra Fényabszorbció különbsége tiszta és hevített, tömény szolárfolyadék között

6.3 Korróziós termékek kiülepedése a csőfalra

6.3.1 A részecskék mozgása a lamináris határrétegben

A lamináris határréteg áramlási viszonyai jól közelíthetők egy α nyírósebességű síkbeli Couette-féle áramlással, ezért a következőkben kisméretű, gömbalakú szilárd részecske folyadékkal történő együttmozgását vizsgálom abban az esetben, ha a részecske körül síkbeli Couette folyás jön létre.

A folyadék és a részecske falhoz viszonyított "abszolút" sebessége, melyek alapján az r sugarú részecske folyadékhoz viszonyított sebessége:

$$\vec{v}_r = (\dot{x} - \ddot{a}y; \dot{y}; 0) \tag{1}$$

Tekintettel arra, hogy a részecske körül inhomogén a sebességeloszlás, és arra, hogy a folyadéknak η dinamikai viszkozitása van, a részecske az *x*, *y* síkra merőleges tengely körül forgást fog végezni, melynek a szögsebessége [*Einstein*, 1906]

$$\varpi = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u} = \left(0; 0; -\frac{1}{2}\alpha\right) \tag{2}$$

A következőkben a részecskékre ható erőket fogom megadni. A *tehetetlenségi erő*, ha feltételezzük, hogy a részecske ρ_r sűrűsége homogén eloszlású, az alábbi alakú:

$$\underline{F}_{\underline{t}} = -\frac{4}{3}r^{3}\pi\rho_{R}\underline{\dot{v}_{R}} = -\frac{4}{3}r^{3}\pi\rho_{R}\left(\ddot{x};\dot{y};0\right)$$
(3)

Általában a részecske nem mozog teljesen együtt a folyadékkal, ezért egy közegellenállási erő is fellép:

$$F_{v} = -6\pi\eta r \underline{v}_{R} = -6\pi\eta r \left(\dot{x} - \alpha y; \dot{y}; 0 \right)$$
(4)

Itt feltételeztem, hogy a közegellenállási erő a Stokes törvénnyel írható le.

A folyadékban forgó részecske mozog, tehát rá a *Magnus-féle hidrodinamikai felhajtóerő* fog hatni, melynek pontos alakját Rubinow és Keller határozták meg [*Rubinov*, 1961]

$$\underline{F}_{M} = \pi r^{3} \rho_{F} \left(\underline{\omega} \times \underline{v}_{R} \right) = \frac{1}{2} \pi r^{3} \rho_{F} \left(\dot{y}; \alpha y; -\dot{x}; 0 \right)$$
(5)

ahol: ρ_F - a folyadék sűrűsége.

Az egyenlőtlen sebességeloszlás miatt szintén hat a részecskére egy hidrodinamikai felhajtóerő, mely Saffmann számításai szerint

$$\underline{F_s} = 6,46\rho_R r^2 \sqrt{\alpha} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} (0;\alpha y; -\dot{x}; 0)$$
(6)

alakú.

A szűrőfelület elektromos tulajdonságainak, valamit a folyadék pH értékének hatása a modellben egy y tengely irányú erővel vehető figyelembe:

$$\underline{F} = \left(0; -f^*; 0\right) \tag{7}$$

A fentiek, valamint Newton II. axiómájának figyelembevételével felírható a mozgásegyenlet. A mozgásegyenlet koordinátás alakja az

$$A = \frac{3\alpha}{8} \left(\frac{\rho_F}{\rho_R} \right)$$

$$B = \frac{9\delta}{2r^2} \left(\frac{\rho_F}{\rho_R} \right)$$

$$C = \frac{1,54}{r} \sqrt{\delta\alpha} \left(\frac{\rho_F}{\rho_R} \right)$$

$$f = \frac{3f^*}{4\pi r^3 \rho_R}$$
(8)

jelölésrendszer bevezetésével a következő alakban írható fel:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - A\dot{y} + B(\dot{x} - \alpha y) &= 0\\ \ddot{y} + B\dot{y} + (A + C)(\dot{x} - \alpha y) &= -f \end{aligned} \tag{9}$$

A fenti másodrendű inhomogén csatolt differenciál-egyenletrendszerhez a következő kezdeti feltételek járulnak:

$$\begin{aligned}
 x(0) &= 0 & \dot{x}(0) = u_0 \\
 y(0) &= h & \dot{y}(0) = v_0
 \end{aligned}$$
(10)

Állandó külső erő esetén, az egyenleten megoldás előtt a következő változótranszformációt célszerű elvégezni:

$$y = \dot{x} - \alpha y \tag{11}$$

Ekkor az egyenletrendszer az alábbi egyszerűbb alakot ölti:

$$\dot{z} + (\alpha - A)\dot{y} + Bz = 0$$

$$\ddot{y} + B\dot{y} + (A + C)z = -f$$
(12)

Most az első egyenletből ý kifejezhető:

$$\dot{y} = -\frac{\dot{z} + Bz}{\alpha - A} \tag{13}$$

Betéve az *y*–irányú sebességet a második egyenletbe kapom, hogy

$$\ddot{z} + 2B\dot{z} + \left\{B^2 - \left[\left(A + C\right)(\alpha - A)\right]\right\}z = f\left(\alpha - A\right)$$
(14)

Ennek a másodrendű inhomogén differenciálegyenletnek az általános megoldását kell megkeresni.

A stacioner megoldás azonnal adódik:

$$z = \dot{x} - \alpha y = \frac{f(\alpha - A)}{B^2 - \lambda^2}, \text{ abol } \lambda^2 = (A + C)(\alpha - A)$$
(15)

A (14)-es differenciálegyenlet homogén részének általános megoldását a

$$z_h \sim e^{rt} \tag{16}$$

alakban célszerű keresni. A homogén egyenlethez tartozó karakterisztikus egyenlet a $\gamma^2 + 2B\gamma + B^2 - \lambda^2 = 0$ alakú, melynek gyökei:

$$\gamma_{1,2} = \begin{cases} -B - \lambda \\ -B + \lambda \end{cases}$$
(18)

A fentiek alapján a (14)-es egyenlet általános megoldása:

$$z = C_1 e^{(-B-\lambda)t} + C_2 e^{(-B+\lambda)t} + \frac{f(\alpha - A)}{B^2 - \lambda^2}$$
(19)

A (13)-as összefüggésből ý meghatározható.

$$\dot{y} = \frac{C_1 \lambda}{\alpha - A} e^{(-B - \lambda)t} - \frac{C_2 \lambda}{\alpha - A} e^{(-B + \lambda)t} - \frac{Bf}{B^2 - \lambda^2}$$
(20)

Ennek integrálásával az y megoldása:

$$y = \frac{C_1 \lambda}{(A - \alpha)(B + \lambda)} e^{(-B - \lambda)t} + \frac{C_2 \lambda}{(A - \alpha)(\lambda - B)} e^{(-B + \lambda)t} - \frac{Bft}{B^2 - \lambda^2} + C_3$$
(21)

Ezután *x* meghatározásához (11)-es transzformációs egyenletet felhasználva kapom

$$\dot{x} = C_1 \left[1 - \frac{\alpha \lambda}{(A - \alpha)(B + \lambda)} \right] e^{(-B - \lambda)t} + C_2 \left[1 - \frac{\alpha \lambda}{(A - \alpha)(\lambda - B)} \right] e^{(-B + \lambda)t} + \frac{Bf\alpha t}{B^2 - \lambda^2} + \frac{f(\alpha - A)}{B^2 - \lambda^2} + C_3 \alpha$$
(22)

Az x megoldás a (22)-es egyenlet integrálásával írható fel:

$$x = \frac{-C_1}{B+\lambda} \left[1 - \frac{\alpha\lambda}{(A-\alpha)(B+\lambda)} \right] e^{(-B-\lambda)t} + \frac{C_2}{\lambda - B} \left[1 - \frac{\alpha\lambda}{(A-\alpha)(\lambda - B)} \right] e^{(-B+\lambda)t} + \frac{Bf\alpha t^2}{2(B^2 - \lambda^2)} + \left[\frac{f(\alpha - A)}{B^2 - \lambda^2} + C_3 \alpha \right] t + C_4$$
(23)

A C_1, C_2, C_3, C_4 integrációs konstansok meghatározásához a (10)-es kezdeti értékek felhasználásával (23), (22), (21) és (20) egyenletekben a t=0 áthelyettesítve írható:

Hosszas, itt nem részletezett számolás után a (24)-es lineáris egyenletrendszerből az integrálási konstansok értékei kifejezhetők:

$$C_{1} = v_{0} \frac{\alpha - A}{2\lambda} - \frac{\alpha}{2}h + \frac{u_{0}}{2} + \frac{f(\alpha - A)}{2\lambda(B + 2)}$$

$$C_{2} = -v_{0} \frac{\alpha - A}{2\lambda} - \frac{\alpha}{2}h + \frac{u_{0}}{2} + \frac{f(\alpha - A)}{2\lambda(B - 2)}$$

$$C_{3} = \frac{v_{0}B}{S} + h \left[1 + \frac{\lambda^{2}\alpha}{(\alpha - A)S} \right] + \frac{\lambda^{2}u_{0}}{S(A - \alpha)} + \frac{f(B^{2} + \lambda^{2})}{S^{2}}$$

$$C_{4} = -v_{0} \left[\frac{\alpha - A}{S} + \frac{\alpha(B^{2} + \lambda^{2})}{S^{2}} \right] - h \left[\frac{B\alpha}{S} + \frac{2\alpha^{2}\lambda^{2}B}{(\alpha - A)S^{2}} \right] + u_{0} \left[\frac{B}{S} + \frac{2\alpha\lambda^{2}B}{(\alpha - A)S^{2}} \right] - \frac{fB}{S^{2}} \left[2(\alpha - A) + \frac{\alpha}{S}(B^{2} + 3\lambda^{2}) \right]$$

$$S = B^{2} - \lambda^{2}$$
(24)

A (23)-as és (21)-es megoldásokba visszaírva a (25) alatti integrációs konstansok értékét, a (9)-es differenciális egyenletrendszer (10)-es kezdeti feltételeket kielégítő megoldása:

$$x = K_1 e^{(-B-\lambda)t} + K_2 e^{(-B+\lambda)t} + K_3 t^2 + K_4 t + C_4$$

$$y = D_1 e^{(-B-\lambda)t} - D_2 e^{(-B+\lambda)t} - D_3 t + C_3$$
(26)

Ahol $K_1, K_2, K_3, K_4, D_1, D_2, D_3$ a (23), (21) és (26) együtthatóinak egybevetéséből számolható. Ez a megoldás a legáltalánosabb esetben is leírja egy gömb alakú részecske mozgását a fejezet elején definiált áramlásban [*Hegyi*, *1*, *1985*].

6.3.2 Részecskék kiülepedése az áramlásból

A (26) megoldás együtthatói és exponensei a folyadék sűrűségének, viszkozitásának, a nyírósebességnek, a részecske sűrűségének, méretének és a részecskére ható erőnek függvényei. Ezen paraméterek különböző konkrét értékei mellett a megoldás diszkutálható.

$$I = 2 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}; R = 10^{-6} m; \alpha = 10s^{-1} \qquad \eta = 1 \cdot 10^{-3} Pas; \rho_R = 2 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$$
(27)

értékekkel számolva teljesül, hogy $B \gg \lambda$.

Feltéve, hogy a faltól távol $f^* = 0$, az erőmentes esetre a (26) megoldás a következőre egyszerűsödik:

$$x = K_4 t + C_4$$

$$y = De^{-Bt} + C_3$$
(28)

ahol: $D = D_1 - D_2$.

Most felhasználhatók konkrétan erre a megoldásra a (10) kezdeti feltételek, s akkor írható:

$$x = u_0 t$$

$$y = h + \frac{v_0}{B} \left(1 - e^{-Bt} \right)$$
(29)

Eliminálva a (29) egyenletrendszerből az időt, megkapom a részecske pályaegyenletét:

$$y = h + \frac{v_0}{B} \left(1 - e^{-\frac{B}{u_0}x} \right)$$
(30)

Látható, hogy a pálya alakja nagymértékben függ a kiinduló kezdeti feltételektől és B-n keresztül a részecske méretétől.



6.11 ábra: A gömbalakú részecskék pályái az áramlásban.

A pályaegyenlet vizsgálatakor látható, hogy $v_0 = 0$ esetén a részecske az y=h egyenesen mozog (6.11 ábrán az l-es eset), v_0 pozitív értéke esetén a részecske eltávolodik az y=0 faltól (2-es eset). Negatív v_0 esetén a részecske aszimptotikusan tart az $y = h + \frac{v_0}{B}$ egyeneshez. Modellünkben a részecske akkor fogódik be a falon, ha a faltól mért távolsága egy megadott δ - val lesz egyenlő($0 < \delta \ll 1$). Feltételezhető, hogy a fal adszorbtív hatása kis hatótávolságú. A negatív v_0 kezdősebességű és be nem fogódó ill. befogódó részecske pályáját a 6.11 ábrán a 3-as ill. 4-es görbe szemlélteti.

Az alábbiakban meghatároztam a részecskék térfogateloszlását az y=0 egyenesen, feltéve hogy a részecskék belépési magassága (*h*) illetve sugara(r) független és egyenletes eloszlású a $(\delta; \delta + H)$ ill. (*O*,*R*) intervallumon, és v_0 értéke rögzített negatív konstans. Jelölje $x_F = x_f(h, r)$ a részecske befogódási távolságát az x=0 egyenestől. Az (30)-as egyenletből következik, hogy

$$x_{F}(h,r) = -\frac{u_{0}}{B} \ln \left[1 - \frac{B\delta}{v_{0}} + \frac{B}{v_{0}} h \right]$$
(31)

ahol (8) figyelembevételével

$$B = \frac{\beta'}{r^2}; \beta' = \frac{9}{2} \varepsilon \left(\frac{\rho_F}{\rho_R}\right)$$
(32)

Az első lépésben meghatároztam x_F sűrűségfüggvényét g(x|r')-t rögzített r = r'esetén. Jelölje $h_r + \delta$ azt a belépési magasságot, amelynél kisebb *h* értékek esetén a részecske egyáltalán befogódhat. A számítások egyszerűsítése végett bevezettem a következő jelöléseket:

$$a = \frac{u_0}{B}; b = -\frac{B}{v_0}; c = 1 - \frac{B\delta}{v_0}$$
(33)

A g(x|r') sűrűségfüggvényre igaz

$$g(x|r') = \frac{d}{dx} P(x_F < x) = P(\delta \le h < \delta + h_r) \frac{d}{dx} P(h < x_F^{-1}(x)|\delta \le h < \delta + h_r)$$
(34)

A (34) második tényezője az $y = \delta$ egyenest potenciálisan elérő részecskék feltételes sűrűségfüggvénye, az első tényező

$$P\left(\delta \le h < \delta + h_{r}\right) = \frac{1}{bH}$$
(35)

annak valószínűsége, hogy a $(\delta, \delta + H)$ intervallumon egyenletes eloszlással belépő részecskék befogódnak.

$$\frac{d}{dx}P(h < x_F^{-1}(x)|\delta \le h < \delta + h_{r'}) = \frac{f(x_F^{-1}(x))}{x_F'(x_F^{-1}(x))}$$
(36),

ahol

$$f(h) = \begin{cases} b; \delta \le h < \delta + h_r \\ 0; egyébként \end{cases}$$
(37)

Kiszámítva (36)-t, a keresett feltétel sűrűségfüggvény alakja

$$\begin{cases} \frac{1}{a}e^{-\frac{x}{a}}, x > 0\\ 0; egyébként \end{cases}$$
(38)

$$g(x|r') = \begin{cases} \frac{1}{abH}e^{-\frac{x}{a}}, x > 0\\ 0; egy\acute{e}bk\acute{e}nt \end{cases}$$
(39)

Ennek alapján az (x_F, r) pár együttes sűrűségfüggvénye

$$g(x|r') = \begin{cases} \frac{1}{abHR} e^{-\frac{x}{a}}, x > 0, 0 < r' < R\\ 0; egyébként \end{cases}$$
(40)

A részecskeszám sűrűségfüggvényéről áttérve a térfogateloszlás sűrűségfüggvényére (gömb alakú részecskékre) kaptam:

$$g_{\nu}(x,r') = \begin{cases} Mr'^{3}e^{-\frac{x}{a}}, x > 0, 0 < r' < R\\ 0; egyébként \end{cases}$$
(41),

ahol

$$M = \frac{4\pi}{3abHR} \int_{0}^{H} \int_{0}^{R} \frac{1}{RH} \frac{4}{3}r' \pi dr' dh'} = \frac{4}{abHR^{4}}$$
(42)

Visszatérve az eredeti jelölésekre kaptam végül is:

$$g_{\nu}(x,r') = \begin{cases} Mr'^{3}e^{-x\frac{\beta}{r}}, x > 0, 0 < r' < R\\ 0; egyébként \end{cases}$$
(43),

$$M = \frac{4|v_0|}{u_0 H R^4}; \beta = \frac{\beta'}{u_0}; (u_0 = 0)$$
(44)

Mivel a (43) valószínűség sűrűségfüggvény arányos a folyadékból egységnyi idő alatt a falra kirakódó részecskék tényleges térfogatával, így írható:

$$V(x,r') = V_k g(x,r')$$
(45),

ahol: V_k a részecskék időegység alatti kezdeti össztérfogata. A g(x,r') és V(x,r') jelentéséből következik, hogy az y=0 falra a (x,x+dx) intervallumon az (r',r'+dr') részecskeméret intervallumban kiülepedő részecskék térfogata időegységenként

$$dV = V(x, r') dx dr'$$
(46),

$$V(x,r') = M_1 r^{3} e^{-x \frac{\beta}{r'^2}}, \quad \text{ahol} \quad M_1 = V_k M$$
 (47)

ahol

A következőkben kiszámoltam az (x, x+dx) intervallumban kiváló össztérfogatot. Ehhez összegezni kell az összes lehetséges méretű részecskére

$$V_{1}(x) = \int_{0}^{R} M_{1} r^{3} e^{-x \frac{\beta}{r^{2}}} dr'$$
(48)

Az integrál a $z = \frac{1}{r^2}$ helyettesítés után

$$V_1(x) = -\frac{1}{2} M_1 \int_{\infty}^{1/R^2} \frac{1}{z^3} e^{-\beta xz} dz$$
(49)

Parciális integrálás után

$$V_{1}(x) = \frac{M_{1}R^{4}}{4}e^{-\frac{\beta x}{R^{2}}} - \frac{M_{1}R^{2}\beta x}{4}e^{-\frac{\beta x}{R^{2}}} - \frac{\beta^{2}x^{2}}{2}\int_{\frac{N}{R^{2}}}^{\infty} \frac{e^{-\beta xz}}{z}dz$$
(50)

Mivel
$$\int_{\frac{1}{R^2}}^{\infty} \frac{e^{-\beta xz}}{z} dz = -Ei(-\beta xz)$$
(51),

ahol Ei(z) az ún. integrál-exponenciális függvény és soralakban előállítható.

Pozitív z-re
$$Ei(\alpha z) = \ln x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\alpha z)^k}{k!k}$$
 (52)

Ezzel

$$V_{1}(x) = \frac{M_{1}R^{4}}{4}e^{-\frac{\beta x}{R^{2}}} - \frac{M_{1}R^{2}\beta x}{4}e^{-\frac{\beta x}{R^{2}}} + \frac{\beta^{2}x^{2}}{2}Ei(-\beta xz)$$
(53)

A számunkra fontos kis X-ekre az x és x^2 szorzó miatt a második és harmadik tag az első mellett elhanyagolható, így kaptam:

$$V_1(x) = \frac{M_1 R^4}{4} e^{-\frac{\beta x}{R^2}}$$
(54)

Felhasználva M_1 definícióját (47), az eredmény végül is

$$V_1(x) = V_0 e^{-\frac{\beta x}{R^2}}$$
(55),

ahol

$$V_0 = \frac{|v_0|V_k}{u_0 H} \tag{56}$$

A (47) egyenletből egyrészt látható, hogy kvalitatíve kisméretű részecskék kisebb mértékben válnak ki a falon, mint a nagyobbak $(\lim_{r \to 0} V(x, r') = 0)$, másrészt véletlenszerű belépést feltételezve a kiülepedés a belépés helyétől exponenciálisan csökken.

6.4 Tanyák, farmok autonóm energiaellátása

Ahogyan az energiaellátást országos méretekben is, úgy a megújuló energiaforrások felhasználását is komplexen kell kezelni. A folyadékos napkollektor is egy rendszer részét képezi. Mivel a magyarországi tanyák energiaellátása nem megfelelő - s ennek kihatása van az ottani életre és munkára – elkészítettem egy komplex energia ellátást biztosító rendszer tervét, megújuló energiaforrásokra alapozva, természetesen integrálva a rendszerbe a használati melegvízet előállító folyadékos napkollektort is.

A tanyavillamosítás folyamatát az MVM RT által közreadott Statisztikai Évkönyvek adatai alapján vizsgálva megállapítható, hogy a tanyák száma – 1990 -ig kb. 100 000. A tanyák villamosítási aránya 1970 – 1990 között duplájára növekedett ugyan, de így is csak 42% –os. A fogyasztók száma ezen időszak alatt 24000–ről 74000–re növekedett. A rendszerváltás óta a tanyavillamosítás folyamata lényegesen nem változott. A megépült hálózatok már építésükkor sem minden esetben voltak szabványszerűek és a meglévő tanyai villamosított hálózatok egy része fizikailag is elavult. A helyzetet vizsgálva valószínűsíthető, hogy a nem villamosított tanyákon élő lakosság száma meghaladja a 100.000 főt.

A családi farmszerű gazdálkodás várható elterjedésével valószínűsíthető, hogy a tanyák szerepe nem fog csökkenni. Ahhoz, hogy civilizált körülmények között lehessen ezeken a tanyákon élni és dolgozni, a tanyavillamosítást nem lehet kikerülni. Mivel ezek a tanyák sok esetben messze esnek a kiépített villamos hálózattól, szükségszerűen adódik egy lokális energiatermelés megvalósításának lehetősége és a megújuló energiaforrások felhasználása. A tanya komplex energiatermelő rendszere.

A továbbiakban megvizsgálom egy családi méretű farm villamosításának lehetőségét, pontosabban egy komplex, csatolt energiarendszer kiépítését a központi energia hálózattól függetlenül. Az energiatermelő egységek nagy részét a megújuló energiaforrások felhasználásával, ezen belül a villamos energia termelést és használati melegvíz termelést elsősorban napenergiával valósíthatjuk meg. Ezek az energiatermelő egységek pillanatnyilag drágának tűnnek, de ismerve a villamos energia hálózat építési költségeit, az országos hálózattól messze fekvő tanyákon a beruházás költsége még így is kisebb lehet, mint a hagyományos hálózat kiépítése. Az üzemeltetés költségei pedig lényegesen olcsóbbak a hagyományosnál. Különösen előnyös, hogy a megújuló energiaforrások használata a hagyományos energiaforrások használatához képest jóval környezetkímélőbb.

Egy, a megújuló energiaforrásokon alapuló tanya energiatermelő rendszerének főbb egységei a következők (6.12 ábra):

fotovillamos egység,

szélgenerátor,

folyadékos napkollektor,

levegős napkollektor, szárító.



6. 12 ábra Tanya komplex energetikai rendszere

A fotovillamos panellel és a szélgenerátorral termelt villamos energia töltésszabályzókon keresztül akkumulátorokat tölt. A villamos energia tárolásnak ez a módja nem a legkörnyezetkímélőbb a hagyományos akkumulátorok miatt, de a tanyák domborzati elhelyezkedése miatt (a magyar tanyák nagy része sík terepen van) egy magas víztárolóba való szivattyúzás, majd a víz potenciális energiájának villamos energiává való átalakítása nem gazdaságos. Mivel ezek az akkumulátorok jóval kíméletesebb üzemi viszonyok között üzemelnek, mint a gépjárművekben és állandóan töltés illetve kisütési ciklusban vesznek részt, ezért várható élettartamuk magasabb, mint az autóban üzemeltetett akkumulátoroké. Ugyanakkor meg kell jegyezni azt a tényt, hogy a kifejezetten szoláris rendszerekhez tervezett és gyártott ún. szoláris akkumulátorok jóval drágábbak a hagyományosnál.

Persze igaz, hogy törekedni kell a rendszert lehetőleg olyan elemekből tervezni, amelyeket már más célra, nagy sorozatban gyártanak, így áruk viszonylag alacsony.

Szükséghelyzetben az akkumulátorok aggregátorról is tölthetők vagy – bár meglehetősen drágán – a tanyán levő erőgép illetve gépjármű generátorával.

A rendszer tartozéka egy 230 V–os, 50 Hz–es inverter olyan fogyasztók miatt, amelyek közvetlenül nem működtethetők az akkumulátorok alacsony egyenfeszültségéről. Megjegyezzük, hogy a legtöbb háztartási eszköznek van olyan típusa, amelyek 12 V egyenfeszültségről üzemeltethetők (TV, videomagnó, rádió, hűtőszekrény, számítógép stb.). Mivel az autóipar is kisfeszültségű berendezéseket használ, az általában használt 230 V–os villanymotorok kiválthatók kisfeszültségű, közvetlenül az akkumulátorokról működtethető motorokra.

Az alkalmazott kisfeszültség miatt az így kialakított rendszer külön előnye a villamos balesetek lehetőségének csökkentése.

Ezzel a villamos energia rendszerrel és az ésszerűen megválasztott fogyasztókkal ellátható egy mezőgazdasági tevékenységeket is folytató család energiaszükséglete. Egy átlagos család igényeit vizsgálva a következő fogyasztással számolhatunk (6.1 táblázat):

Fogyasztók	Teljesítmény W	Napi használat óra	Napi energia fogyasztás, Wh
Mosás, vasalás:	1500	1	1500
Szivattyúk:	200	5	1000
Darálók:	200	2	400
Háztartási hűtőgép:	250	4	1000
Hifi, PC	200	5	1000
Világítás:	100	5	500
Napi energia Fogyasztás			5400

6.1 táblázat Becsült villamos energia fogyasztás családi farmnál

A gazdaságban szivattyú szükséges a vizes kollektor keringtető rendszeréhez, vízszivattyúzáshoz, szennyvízszivattyúzáshoz, öntözéshez. A szivattyúk és a darálók a fentieknek megfelelően lehetőleg kisfeszültségű motorokkal hajtottak. Ezek a motorok viszonylag kis teljesítményűek is lehetnek, ezzel csak a szükséges feladatok időigénye növekszik.

A Hifi berendezések és a számítógép közvetlenül az akkumulátorokról is működtethető.

Az abszorpciós rendszerű háztartási hűtőgépeknek vannak olyan típusai, amelyek 12 V–ról illetve PB gázpalackról is üzemeltethetők. Az 6.12 ábrának megfelelően a sütésre – főzésre nem villamos energiát, hanem PB gázt célszerű használni.

A világításra természetesen nem a hagyományos izzólámpákat, hanem kompakt fénycsöveket célszerű használni. A fent jelzett energiaigény kb. 10 db 10 W–os kompakt fénycső teljesítményigénye.

A fenti igényeket egy 1500 W-os fotovillamos panel és egy 500 W-os szélgenerátor kielégítheti. Sajnos a magyarországi viszonylag alacsony szélsebességek miatt a kisteljesítményű, alacsony magasságú szélgenerátorok alkalmazásának szerepe nem számottevő.

Természetesen az összes egység egyidejű használatára nincs lehetőség, de igazából igény sincs. A fogyasztók használatának időbeosztásánál a megszokottnál átgondoltabban kell eljárni.

A rendszer másik fontos része a családi és gazdasági szükségleteket ellátó, meleg vizet előállító rendszer. Ennek központi része egy folyadékos rendszerű napkollektor, amelyben a fagyálló folyadékot keringtető szivattyú keringteti, és hőcserélőn keresztül melegíti a meleg vizes tartály kb. 150 liter vízét. A 6.12 ábrának megfelelően a vízmelegítésre lehetőség van egy másik hőcserélőn keresztül, a tanyán keletkezett biomassza elégetésével, az előzővel párhuzamosan is. A fenti melegvíz szükségletet egy kb. 2 m²-es folyadékos napkollektor képes kiszolgálni.

A rendszernek része egy levegős napkollektor, amely mezőgazdasági jellegű tanyát feltételezve szárításra használható.

Az épületek fűtése, mivel a háztartásnak ez az egyik legenergiaigényesebb része a hagyományos módon (biomassza) oldható meg.

Az Európai Unióban néhány állattartással foglalkozó tanyán kisméretű biogáztermelő és hasznosító üzem is található, amely szintén integrálható a fentiekben vázolt tanya komplex energetikai rendszerébe.

Gazdaságossági értékelés

Az előzőkben vázolt komplex energetikai rendszer részbeni kiépítéssel is megvalósítható. A következőkben a napkollektoros melegvíz termelést külön is elemeztem a teljes rendszer gazdaságossági értékelése mellett.

A használati melegvíz készítő rendszer energia termelésének elemzése

A folyadékos napkollektoros rendszer energiatermelésének becsléséhez egy 1,65 m² felületű SKV típusú kollektorának 45°-os szögre vonatkozó energiatermelési adatait használhatjuk. (6.13 ábra)





A kollektor segítségével összegyűjtött éves energiamennyiség számítása során a 6.13. ábra havonkénti sugárzás jövedelmeiből számítva éves átlagra 9 kWh/kollektor/nap értéket kaptunk, míg ugyanez az érték május és szeptember között 10,6 kWh/kollektor/nap volt. Egy kollektorral egy év alatt összegyűjthető energia mintegy 3.300 kWh/év.

Egy átlagos családot feltételezve a szükséges használati melegvíz (150 liter, 60 °C) előállításához szükséges energia naponta (10 °C-os hálózati vízhőmérséklet mellett) 8,7 kWh. Ez éves szinten 3.194 kWh/év. Ennek kb. 50-60%-a nyerhető napenergiából, ami 1.917 kWh/év.

A villamos energia árakat a kedvező átlagos éjszakai tarifával, a használati melegvíz készítés céljára, az éves megtakarítás 20 Ft/kWh egységárral számolva kb. 40.000 Ft/év.

A berendezések jelenlegi ára mellett a megtérülési idő nem éppen kecsegtető, de olyan területeket lehet így a civilizált felhasználás körébe bevonni, amelyeket - az infrastruktúra hiánya miatt - egyébként nem, például tanyák, falusi turistaházak, vadászházak. Más szempontból viszont a környezet iránt érzékeny réteg feltehetően hajlandó ezért felárat is fizetni. A nyugat-európai példák azt mutatják, hogy a piac növekedésével a szoláris eszközök ára rohamosan csökkenhet, a hagyományos energiák árában viszont további növekedés prognosztizálható. A megvalósítás gazdaságossága.

Jelenlegi árakon a fent vázolt komplex energetikai rendszer beruházási költségei a következőkben becsülhetők:

Rendszerparaméterek	Ár, eFt
1500 W-os fotovillamos panel	2000
Szélgenerátor	400
vizes napkollektor	500
levegős napkollektor	200
Akkumulátorok	100
Aggregátor	100
vezérlő, szabályozó áramkörök, inverter	100
Szivattyúk	50
kompakt fénycsövek (10 db)	10
kombinált üzemű hűtőgép	40
12 V-os villanymotor (daráló stb.)	30
szerelési anyagok (csövek, kábelek stb.)	300
szerelési költségek	500
Összesen:	4130

6.2 táblázat Szoláris rendszer beruházási költsége

A rendszer jelenlegi árakon tehát kb. 4 millió Ft–ból valósítható meg. Mivel 1 km hálózat kiépítése kb. 2 millió forintba kerül, az országos hálózattól 2 km – rel messzebb levő tanyán az itt vázolt rendszer beruházási költsége kisebb, mint a hagyományos villamos hálózat megépítése. Természetesen egy hagyományos benzines aggregátoros, vagy diesel generátoros energiaellátás beruházási költsége jóval kisebb, de üzemeltetése a fent vázolt rendszernél költségesebb és idővel egyre költségesebb lesz. A fenti beruházási költségek idővel csökkennek, mivel a különösen jelentős részt kitevő fotovillamos panel ára várhatóan csökkenni fog, és valószínűsíthető, hogy a hagyományos villamos energiás üzemeltetés költségei emelkednek. Mivel az energiatermelő rendszer viszonylag kevés mozgó, mechanikai alkatrészt tartalmaz, a várható élettartam hosszú, 30 év nagyságrendű.

7. EREDMÉNYEK

7.1 Az eredmények összegzése

A megújuló energiafelhasználás napjaink aktuális kérdése. A fosszilis energiahordozók egy része kifogyóban van, és az üvegházhatású széndioxid termelés miatt súlyos klimatikus gondokat okoznak.

Használati melegvíz előállítása a napenergia segítségével már napjainkban is rentábilis. A napkollektorok hatásfokának növeléséhez, tervezéséhez és az optimális üzemeltetési viszonyok megteremtéséhez szükséges a hőhordozó közeg fizikai paramétereinek ismerete, melyekre nézve az irodalom nagyon hiányos. A célkitűzésben meghatározott feladatokat sikerült megvalósítani:

- Megmértem a szolárfolyadék sűrűségét és összefüggést állítottam fel a hőmérséklet és a hígítási arány függvényében.
- A szolárfolyadék reológiai vizsgálatával megállapítottam, hogy a szolárfolyadék newtoni típusú és összefüggést állítottam fel a dinamikai viszkozitás hígítástól és hőmérséklettől való függésére.
- A viszkozitás ismeretében az áramlás minőségében szerepet játszó Reynolds szám meghatározható, ezzel kiszámolható milyen sebesség esetén megy át az áramlás laminárisból turbulensbe. Ezzel a már meglevő napkollektorok hatásfoka is növelhető. Egy konkrét napkollektor típusra kiszámoltam a lamináris-turbulens átmenetet.
- A propilénglikol-víz hígítási aránya legpontosabban optikai műszerrel mérhető. Refraktométerrel való mérésekkel összefüggést állapítottam meg a törésmutatóra a hígítási arány és a hőmérséklet függvényében.
- A szolárfolyadék hővezetési együtthatójának ismerete hőtechnikai szempontok miatt alapfontosságú. A folyadék hővezetési együtthatóját mérő készüléket, részint a kiértékelő elektronikával együtt, magam készítettem és matematikai modellel elemeztem. Meghatároztam a szolárfolyadék hővezetési együtthatóját a hígítás függvényében.
- Az előbbiekhez hasonlóan hőtechnikailag a szolárfolyadék fajhője is meghatározó, ezért mérésekkel összefüggést állapítottam meg a fajhő hígítástól való függésére.
- Több éve működő napkollektorokban a folyadék megbarnul. Fotokolorimetrikus mérésekkel és mikro filtrációval megállapítottam, hogy az elszíneződésnek két oka is van. Egyrészt a korróziótermékek, másrészt a napkollektort ért túlhevülés – hősokk. A korróziótermékek áramlásban való mozgását matematikai-fizikai modellel írtam le. A hősokkot mesterségesen szimulálva előidéztem az elszíneződési effektus. Egyúttal objektív mérésekkel a folyadék színét is meghatároztam.

Remélem a dolgozat használható jobb hatásfokú folyadékos napkollektor tervezésénél és az áramlási viszonyok optimális beállításánál is segítséget nyújthat.

7.3 Summary

The use of renewable energy sources has great actuality nowadays. We are running out of some fossil energy sources, the usage of them generates serious climatic effects because of the greenhouse gas emission. In long term the photovoltaic modules can play significant role in the electrical energy production, but now they are very expensive yet and their efficiency is low.

The domestic hot water production by solar energy is profitable already now. However for the design, for the development of the collector efficiency and for achieving optimal operating conditions it is necessary to know the physical properties of the solar liquid (the heat transport medium). In the literature very few data can be found on this topic.

During my research the next goals could be reached:

- I measured the density of the solar liquid and I established a relationship for the density as a function of the temperature and dilution ratio.
- By examining the rheological characteristic of the solar liquid, I concluded that it is a Newtonian liquid and I determined a relationship for the dynamic viscosity as a function of the dilution ratio and temperature.
- If the viscosity is known, the Reynolds number which is an important indicator of the quality of the flow can be determined, and based on this the critical velocity, where the laminar flow changes to turbulent one can be allocated. By knowing this critical value, the efficiency of the solar collectors can be developed. I determined the critical laminar turbulent transition speed for a specific solar collector.
- The most exact method to determine the dilution ratio of propylene glycol is the use of optical measurement. By a refractometer I determined a relationship for the refraction index as a function of the dilution ratio and temperature.
- The knowledge of the thermal conductivity is essential for the thermal processes. I developed a measuring equipment together with the interpreter electronics for determining this quantity. I set up a mathematical model for determining the thermal conductivity from the measured data.
- The specific heat of the thermal liquid is also essential, hence I developed a formula for the dilution ratio dependence of the specific heat.
- The color of the solar liquid used for longer time in collectors changes to brown. By photocolorimetry and micro filtration I concluded the two reasons of the effect: the corrosion and the heat shock. For describing the movement of the corrosion particles I developed a mathematical model. I simulated the heat shock process and generated the browning effect.

I hope that my research results can help the development of the solar collectors and to optimize the operations of them.

7.3 Új tudományos eredmények

1. Mérések alapján összefüggést állítottam fel a szolárfolyadék sűrűségére a propilénglikol-víz keverési arány függvényében (20 ⁰C-on):

,

$$\rho_{(\alpha)} = -66,892 \ \alpha^2 + 117,2 \ \alpha + 999,06$$

ahol $0 \le \alpha \le 1$ a propilénglikol-víz keverési aránya ($\alpha = 1$ a tömény propilénglikol).

Meghatároztam a tömény szolárfolyadék sűrűségfüggését a hőmérséklettől:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta t) = 1068,3 (1 - 8,73 \cdot 10^{-4} t),$$

ahol t a hőmérséklet °C-ban, és $[\rho]=kg/m^3$.

2. Rotációs viszkoziméterrel való mérésekkel igazoltam, hogy а propilénglikol alapú szolárfolyadék newtoni típusú folyadék. Viszkozimetrikus mérésekkel összefüggést állítottam fel a szolárfolyadék viszkozitására hőmérséklet függvényében különböző a (T) (propilénglikol – víz) keverési arányok (α) mellett:

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{E}{RT}}$$

$$E=12394\alpha^{2}+8427,1\alpha+15370$$

$$\eta_{0}=2\cdot10^{-6}\alpha^{2}-3\ 10^{-6}\alpha+2\cdot10^{-6}$$

viszkozitás: $[\eta_0]=[\eta]=Pas$, viszkozitási aktiválási energia: [E]=J/mol, univerzális gázállandó: R=8,31 J/mol K , hígítás mértéke: $0 < \alpha < 1$, $[\alpha]=1$

A gyakorlatban könnyebben használható polinomiális összefüggést is kidolgoztam:

$$\eta(\alpha,t) = A_{\eta}(\alpha) \cdot t^{2} + B_{\eta}(\alpha) \cdot t + C_{\eta}(\alpha),$$

Az együtthatók értékei a leggyakrabban használt 50%-os szolárfolyadékra:

$$A_{\eta}(0,5)=1,525 \cdot 10^{-3} \text{ mPas/}^{\circ}\text{C}^{2}$$

 $B_{\eta}(0,5)=0,2122 \text{ mPas/}^{\circ}\text{C}$
 $C_{\eta}(0,5)=8,5718 \text{ mPas}$

3. Kalorimetrikus mérésekkel összefüggést állítottam fel a szolárfolyadék fajhőjére különböző keverési arányok mellett.

$$c(\alpha) = -19,643\alpha + 4176,4$$

ahol α a hígítási arány (0< α <1), c a szolárfolyadék fajhője [c]=J/kgK.

4. A szolárfolyadék hővezetési együtthatójának (λ) meghatározásához mérőeszközt készítettem. A mérőeszköz használhatóságát numerikus számításokkal igazoltam a hővezetési egyenlet alapján. Mérésekkel összefüggést állítottam fel a szolárfolyadék hővezetési együtthatójára a hígítás (α) függvényében:

$$\lambda$$
= - 0,3766 α + 0,5876
[λ]=W/mK, 0<α<1

 Laboratóriumi Abbe refraktométeres mérésekkel a szolárfolyadék törésmutatójára (n) vonatkozó összefüggést dolgoztam ki a hőmérséklet (t) és a keverési arány (α) függvényében:

ahol:

$$n = A_n(\alpha) t + B_n(\alpha)$$

$$A_n(\alpha) = -0,0002 \alpha^2 - 0,0004 \alpha - 0,0002 \text{ és}$$

$$B_n(\alpha) = 0,1 \alpha + 1,3397$$

Mivel leggyakrabban szobahőmérsékleten mérünk, 20 0 C-ra lineáris összefüggést készítettem (relatív hiba δ =0,2%):

$$n = 0,1033 \alpha + 1,3347$$

 $[n] = [\alpha] = 1.$

6. Síkkollektorok esetén, az általam mért anyagi paraméterek segítségével számításokat végeztem 50%-os szolárfolyadékra, a lamináris-turbulens átmenetre vonatkozólag. Meghatároztam a jobb hőátadás, ezzel együtt a jobb hatásfok érdekében az optimális hozam értékét (2·10⁻⁴ m³/s).



7.1 ábra Lamináris- turbulens átmenet napkollektornál

7. Fotokolorimetrikus mérésekkel és mikroszűréssel igazoltam, hogy a használt szolárfolyadék elszíneződését egyrészt a korróziós termékek, másrészt a szolárfolyadék túlhevüléséből – hősokkjából - származó elszíneződés okozza. Meghatároztam, hogy a szolárfolyadék hevítésének hatására a 350-400 nm-es hullámhossz tartományban a legnagyobb az optikai elnyelés növekedése.

7.4 Következtetések és javaslatok

A megújuló energiaforrások felhasználásának úgy tűnik minden körülmény kedvez. A környezetvédelmi kérdések egyre fontosabbá válnak, a fosszilis energiahordozó árak egyre emelkednek. A gázellátásunk egyoldalúsága a kiszolgáltatottság érzését kelti.

A háztartások használati melegvíz ellátása jelentős tétel az energia számlában, ezért kívánatos volna a napkollektorok nagyobb számba való elterjesztése. Az árak csökkentése pl. a megújuló energiát használó berendezések ÁFÁ-jának eltörlésével vagy csökkentésével is segíthető volna. A nemzetközi trendek EU-s források bevonását is lehetővé tennék. Mindez persze a politikai döntéshozók feladata. A témával foglalkozók feladata a szakmai kérdések megoldása mellett a döntéshozók tájékoztatása és a fenti célokkal kapcsolatos lobbizás.

A dolgozat készítése közben a kutatás klasszikus gondjával találkoztam. Minél több kérdést megoldottam annál több újabb feladat vetődött fel.

A későbbiekben részletesebb mérésekkel a hővezetési együttható és fajhő hőmérsékletfüggését is célszerű volna meghatározni.

A számítógépek teljesítményének fejlődése lehetőséget nyújt, hogy pl. ANSYS CFX segítségével a napkollektor részletesebb áramlási viszonyait megvizsgálhassuk.

Áramlási programok segítségével meg kellene vizsgálni, hogy a hővezetési együttható méréséhez használt berendezésnél milyen feltételek (rétegvastagság, geometriai adatok stb.) esetén indul meg a konvekció.

Nagyobb mennyiségű "használt" szolárfolyadék minta segítségével a benne levő korróziós részecskék alaposabb vizsgálatát is el kellene végezni.

A Fizika és Folyamatirányítási Tanszéken levő folyadékos napkollektor segítségével, megfelelő nyomás és áramlásmérő detektorok felhasználásával mérésekkel is igazolni kellene az áramlási viszonyok hatásfokra kifejtett hatását.

A szolárfolyadék megfelelő fizikai paramétereinek birtokában a napkollektor tervezését is át kellene gondolni. Úgy tűnik a jelenlegi sík kollektorokat ad-hoc módszerrel tervezték. Meg kellene vizsgálni, hogy pl. az abszorber csövek milyen száma, elhelyezkedésük sűrűsége, hossza ad optimális megoldást.

MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

- 1. ASHRAE Guide and Data Book (1965)
- BAHVALOV N. SZ. (1977): A gépi matematika numerikus módszerei analízis, algebra, optimalizálás, közönséges differenciálegyenletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 3. BÁRÁNY N. (1951): Optikai műszerek elmélete és gyakorlata, Nehézipari könyv- és folyóirat kiadó vállalat, Budapest
- 4. BARÓTFI I. (2003): Környezettechnika, Mezőgazda Kiadó
- 5. BEKE J. (2000): Műszaki hőtan mérnököknek, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- 6. BENEDICT R. P. (1984): Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements, Wiley, New York
- 7. BOBOK E. (1987): Áramlástan bányamérnököknek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 8. BODRY (1976): A simple comversion formula for "T" (copper constantan) thermocouple readings, Journal of Sci. Instr.
- 9. BOHL W. (1983): Műszaki áramlástan, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 10. BOHOCZKY F. (2005): Megújuló energia források magyarországi felhasználása, "A magyar energiapolitika helyzete és jövője" konferencia, Debrecen
- 11. BOROS A. (1985): Electrical Measurement in Engineering, Akadémiai Kiadó, Budapest
- 12. BUDÓ-MÁTRAI (1980): Kísérleti fizika III., Tankönyvkiadó, Budapest
- 13. BUZÁS J. (2009): Napenergiás melegvíz-készítő és tároló rendszerek, Doktori értekezés, Gödöllő
- BUZÁS J., FARKAS I., JEDRISKO, C. (1999): Simulation of a solar domestic hot water system, Energy and Agriculture towards the Third Millenium, Athens, Greece, 2-5 June 1999 Proceedings, Volume 1, p. 500-507.
- 15. BUZÁS J., VAN STRATEN G. (1996): Solar hot water system study examples with Matlab/Simulink, MRS Report 96-6, Tempus 9709-95 Report, Wageningen, The Netherlands. Hozzáférhető a SZIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén

- 16. BUZÁS J. (2005): Napenergiás melegvíz-készítő és tároló rendszerek, Doktori értekezés, Gödöllő
- 17. M. CUMO, A. NAVIGLIO (2000): Thermal Hydraulics, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida
- CZIRFUSZ M., FEJES G., DR. SZABÓ Z., VADAS I. (1966): Szűrés, Műszaki könyvkiadó, Budapest – szerk. Szabó Zoltán
- 19. J.A. DUFFIE, W.A. BECKMAN (1991): Solar engineering of thermal processes, Second edition, John Wiley and Sons, Inc, USA
- 20. EINSTEIN A. (1906): Zur Theorie der Brownschen Bewegung, Ann. Phys, 19, 37
- 21. FARKAS (2005):Fotovillamos napenergia-hasznosítás szemináriumok,
 szerk. Farkas István Szent István Egyetem, Fizika és Folyamatirányítási Tanszék Gödöllő
- 22. FARKAS I.(1994): Tudomány és gyakorlat a megújuló energiaforrások hasznosításáért, Környezet és Fejlődés, V/5, p. 5-6.
- 23. FARKAS I.-FENYVESI L.-KURTÁN S. (1989): Megújuló energiaforrások hasznosításának lehetőségei a hazai mezőgazdaságban, KVM Tanulmány, Budapest
- 24. FARKAS I., BUZÁS J., LÁGYMÁNYOSI A., KALMÁR I. (2001): Napenergiás uszodai vízmelegítő rendszer, Magyar Energetika, IX (3) p. 17-20.
- 25. FARKAS I.-FENYVESI L.-KURTÁN S. (1989): Megújuló energiaforrások hasznosításának lehetőségei a hazai mezőgazdaságban, KVM Tanulmány, Budapest
- 26. FÁBRY GY., DR. LENGYEL A., DR. HODÚR C., DR. SZABÓ G., DR. KEREKES B., DR. VÁRSZEGI T. (1995): Élelmiszeripari eljárások és berendezések, Mezőgazda Kiadó, Budapest – szerk. dr. Fábry György
- 27. FIORENTINI HUNGARY KFT. (2000): Úszómedence vízmelegítő és óvoda használati melegvíz-készítő napenergia-hasznosító berendezés Gödöllő, Dokumentáció. Hozzáférhető a SZIE Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén
- 28. FÜLÖP Z. (1969): Hőtechnikai alapmérések, Tankönyvkiadó, Budapest
- 29. A.C. DE GEUS (1997) Market development of solar domestic howater systems in the Netherlands policy, developments and results, 7th international Conference on Solar Energy at High Latitudes, June 9-11, 1997 Espoo-Otaniemi, Finland, Proceedings, Vol. 2, pp. 480-486.

- 30. GÉCZYNÉ VÍG P. (2007): Napkollektoros rendszerekmodellezése neurális hálóval, doktori értekezés, Gödöllő
- 31. GYURKOVICS L. (1982): A napenergia hasznosítása az épületgépészetben, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 32. GYURKOVICS L. (1987): Hőtermelés napsugárból, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 33. HÜTTE (1993): A mérnöki tudományok kézikönyve, Springer Hungarica Kiadó Kft., Budapest
- 34. IMRE L., BITAI A., GERHART H. (2000): Megújuló energiaforrások, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetika Tanszék, Budapest
- IMRE L.(1994): A napenergia hasznosítása Magyarországon, Hatékony energia, Energiahatékonysági Folyóirat, I/2. sz., p. 15.
- 36. International Energy Agency (1992): Energiapolitika Magyarország 1991. évi felmérés, Párizs
- 37. KASZTKIN A. G. (1976): Alapműveletek, gépek és készülékek a vegyiparban, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 38. LANDAU-LIFSIC (1980): Elméleti fizika VI, Tankönyvkiadó, Budapest
- G.A. KORN, T.M. KORN (1975): Matematikai kézikönyv műszakiaknak, Műszaki kiadó, Budapest
- 40. KUTATELADZE S. S., BORISHANSKII V. M. (1966): A concise encyclopedia of heat transfer, Pergamon Press Ltd., Oxford, UK
- 41. LUKÁCS GY. (1963): Méréstechnikai kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 42. MIKA J. (2002): Fizikai Szemle 2002/9, A globális klímaváltozásról, Budapest
- 43. MISES F. (1967): A mechanika és fizika differenciál- és integrálegyenletei II., Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 44. MÓRICZ F. (1988): Numerikus analízis I., Tankönyvkiadó, Budapest
- 45. OECD tagországok energiamérlege 1980 1989, Párizs: OECD, 1991
- 46. PERRY J. H. (1968): Vegyészmérnökök kézikönyve, I., II. kötet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 47. RALSTON A. (1969): Bevezetés a numerikus analízisbe, Műszaki Könyvkiadó, Budapest

- 48. RAZNJEVIC K. (1964): Hőtechnikai táblázatok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- 49. RUBINOW S.I., KELLER J.B. (1961): The Transverse Force on a Spinning Spere in a Viscous Fluid, J. Fluid Mech, 11, 447
- 50. SERES I. (2002): Fa, mint energetiai növények szárításának és méréstechnikai problémáinak vizsgálata, Doktori értekezés, Gödöllő
- 51. SITKEI GY. (1997): Gyakorlati áramlástan, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- 52. SZABÓ Z., DR. CSURY I., DR. HIDEGKUTI GY. (1987): Élelmiszeripari műveletek és gépek, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- 53. Technika Műszaki Szemle (1994), XXXVIII. évf., 5. sz. 1994. máj
- 54. TÓTH L., Horváth G. (2003): Alternatív energia, szélmotorok, szélgenerátorok, Szaktudásház, Budapest
- 55. TYIHONOV A. N., SZAMARSZKIJ A. A. (1956): A matematikai fizika differenciálegyenletei, Akadémiai Kiadó, Budapest
- 56. ZACHÁR A. (2003):Termikus rétegződés használati melegvíztárolókban. PhD dolgozat
- 57. WEAST R. C. (1982): CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida

M2: A dolgozathoz kapcsolódó saját irodalom:

- 1. **Hegyi K.** (1985): A szűréselmélet és mezőgazdasági alkalmazása. (egyetemi doktori disszertáció, Gödöllő, 1985. 130 p.)
- Vincze Gy., Hegyi K., Vékony., Seres I. (1989): Hőmérsékletmérés termopárral hidegpont nélkül MTA-MÉM Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási Tanácskozása. A mezőgazdaság gépesítése. VI. szekció. Gödöllő, 1989. I. 17-18.
- Vincze Gy., Hegyi K. (1993): Részecskekollektívumok szedimentációs folyamatának vizsgálata ülepítőtartályban. MTA-MÉM Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási Tanácskozása. A mezőgazdaság gépesítése. VI. szekció. Gödöllő, 1993. I. 18-20.
- Vincze Gy., Hegyi K., Bencsik T., Dudás J. (1994): RHEOTEST 2. viszkoziméter alkalmazása nemnewtoni folyadékok vizsgálatára. MTA-MÉM Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási Tanácskozása. A mezőgazdaság gépesítése. VI. szekció. Gödöllő, 1994.
- 5. Farkas I., Buzás J., **Hegyi K.** KardonB., Seres I., (1995): Napenergia mezőgazdasági hasznosítása. Megújuló energiaforrások hasznosítási lehetőségei Magyarországon, Magyar-EU Energia Központ Tanulmány 6. fejezet, Budapest, 1995.
- 6. Hegyi K., Farkas I. (1995): Hagyományos és megújuló energiaforrások összehasonlítása különböző mezőgazdasági technológiáknál. (előadás) MTA-MÉM Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási Tanácskozása. A mezőgazdaság gépesítése. VI. szekció. Gödöllő, 1995. I. 17-18. p.28.
- Hegyi K. (1995): Tanyák energiaellátása megújuló energiaforrások felhasználásával. MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási Tanácskozása. A mezőgazdaság gépesítése. VI. szekció. Gödöllő, 1995. I. 17-18.
- Hegyi K.-Farkas I. (1995): Hagyományos és megújuló energiaforrások összehasonlítása különböző mezőgazdasági technológiáknál. MTA Agrár-Műszaki Bizottság, Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 1995. jan. 17-18, 1. kötet, p. 421-424.
- Hegyi K.-Farkas I. (1995): Megújuló és hagyományos energiaforrások mezőgazdasági felhasználása és oktatásának kérdései. INTACT '95, Környezetvédelmi Kongresszus és Kiállítás, I. kötet, 1. Budapest, 1995. márc. 21-24, p. 102-109.
- 10.Farkas I.-Hegyi K. (1995): Hagyományos és megújuló energiaforrások a mezőgazdaságban, Magyar Energetikai Társaság, Energia Fórum 95, Szeged, 1995. ápr. 24-26. (Megjelent a Magyar Energetika, 1995/6 sz., p. 23-26.)

- 11.Farkas I., **Hegyi K.,** Kardon B., Seres I. (1995): Development of a standalone PV power system for remote villages making use of pumped water energy storage, Contribution Report to the concept proposed for the Romanian sites, Department of Physics and Process Control, University of Agricultural Sciences, Gödöllő, Hungary, No. 2, June 1995.
- 12.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., **Hegyi K.,** Kardon B., Seres I. (1995): Napenergia kommunális célú hasznosításának lehetőségei, Esettanulmány, Gödöllő Város Önkormányzata, No. 3, Gödöllő, 1995. okt.
- 13.**Hegyi K.** (1995): Renewable Energy for Remote Farms. Anniversary Seminar on Energy and Environment, Gödöllő, 1995. IX. 27-30.
- 14.Farkas I., Buzás J., **Hegyi K.,** Kardon B., Seres I. (1995): Napenergia mezőgazdasági hasznosítása. Megújuló energiaforrások hasznosítási lehetőségei Magyarországon. Magyar-EU Energia Központ Tanulmány 6. fejezet, Budapest, 1995.
- 15.Farkas I., **Hegyi K.,** Kardon B., Seres I. (1995): Development of a standalone PV power system for remote villages making use of pumped water energy storage. Contribution Report to the concept proposed for the Romanian sites, Department of Physics and Process Control, University of Agricultural Sciences, Gödöllő, Hungary, No. 2, June 1995.
- 16.Farkas I., Bencsik T., BuzásJ., **Hegyi K.,** Seres I. (1995): Application possibilities of a PV energy supply system combined with water storage in Hungary, International Conference on Rational Use of Renewable Energy Sources in Agriculture, in connection with the Environmental Control, 1995. June 2-8, Budapest, Hungary, p. 71.
- 17.Farkas I., Buzás J., **Hegyi K.,** Kardon B., Seres I. (1995): Napenergia mezőgazdasági hasznosítása. Megújuló energiaforrások hasznosítási lehetőségei Magyarországon, Magyar-EU Energia Központ Tanulmány 6. fejezet, Budapest, 1995.
- 18.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., Hegyi K., Seres I. (1996): Development of a standalone PV power system for remote villages making use of pumped water energy storage, Feasibility study on potential Hungarian sites, Department of Physics and Process Control, University of Agricultural Sciences, Gödöllő, Hungary, No. 4, January 1996.
- 19.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., **Hegyi K.,** Seres I. (1996): PV operated energy and water supply system in a grape farm. EuroSun'96, Proceedings, Vol. 2, Freiburg, 1996. p. 655-659.

- 20.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., Hegyi K., Seres I. (1996): Development of a standalone PV power system for remote villages making use of pumped water energy storage, Feasibility study on potential Hungarian sites, Department of Physics and Process Control, University of Agricultural Sciences, Gödöllő, Hungary, No. 4, January 1996.
- 21.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., **Hegyi K.,** Lágymányosi A., Seres I. (1996): Development of a standalone PV power system for remote villages making use of pumped water energy storage, Feasibility study on grape farm applications, Department of Physics and Process Control, University of Agricultural Sciences, Gödöllő, Hungary, No. 5, April 1996.
- 22.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., **Hegyi K.,** Seres I. (1996): Application possibilities of a PV energy supply system combined with water storage in Hungary, International Conference on Rational Use of Renewable Energy Sources in Agriculture, in connection with the Environmental Control, 1996. June 2-8, Budapest, Hungary, p. 71.
- 23.**Hegyi K.** (1996): Small farms powered by renewable energy. Seminar on Energy and Environment, Gödöllő,1996. IX. 3-6.
- 24.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., **Hegyi K.,** Seres I. (1996): PV operated energy and water supply system in a grape farm. EuroSun'96, Proceedings, Vol. 2, Freiburg, 1996. p. 655-659.
- 25.**Hegyi K.,** Fekete M., Farkas I., Buzás J. (1997): Application of the renewable energy sources to the rural tourism, 3rd Seminar on Energy and Environment, Gödöllő, Hungary, November 10-12, 1997. p. 8.
- 26.**Hegyi K.** (1997): Villamos hálózatok felújítása a megújuló energiaforrások felhasználásával. MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási Tanácskozása. A mezőgazdaság gépesítése VI. szekció, Gödöllő, 1997. I. 21-22
- 27.Hegyi K., Farkasné Fekete M., Farkas I., Buzás J. (1997): Megújuló energiaforrások és a fenntartható fejlődés a magyar mezőgazdaságban, Vállalati környezet és alkalmazkodás az élelmiszertermelésben c. konferencia, Gödöllő, 1997. okt. 9-10.
- 28. Hegyi K., Fekete M., Farkas I., Buzás J. (1997): Application of the renewable energy sources to the rural tourism, 3rd Seminar on Energy and Environment, Gödöllő, Hungary, November 10-12, 1997. p. 8.
- 29. Hegyi K., Farkasné Fekete M., Farkas I., Buzás J. (1998): Megújuló energiaforrások és a fenntartható fejlődés a magyar mezőgazdaságban. Gödöllői Agrártudományi Egyetem, Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar, Tudományos Közlemények 2., 1998. p. 13-18.

- 30.Farkas I., Bencsik T., Buzás J., **Hegyi K.,** Seres I. (1998): Víztározóval kiegészített fotovillamos energiatermelő rendszerek telepíthetősége, Magyar Energetika, VI. évf., 1998/1. sz., p. 25-29.
- 31.**Hegyi K.,** Farkasné Fekete M., Farkas I., Buzás J. (1998): Megújuló energiaforrások felhasználása a falusi turizmusban. VI. Nemzetközi Agrárökonómiai Tudományos Napok, Gyöngyös, 1998. márc. 24-25, 2. kötet, p. 67-72.
- 32.Farkas I., Biró A., Buzás J., Hegyi K., Lágymányosi A., Seres I., Seres E.E., Szűcs M. (1998): Oktatási és demonstrációs célú napenergia hasznosító berendezések, Magyar Energetika, VI. évf., 1998/3. sz., p. 17-24.
- 33.Hegyi K., Farkas I., Fekete M. (1998): Megújuló energiaforrások környezetvédelmi aspektusai, A ma és holnap fizikája Magyarországon, Fizikus Vándorgyűlés, Gödöllő, 1998. aug. 25-28, Kivonatok Gyűjteménye, p. 61-63.
- 34.Farkas I., Buzás J., **Hegyi K**., Fekete M., Bartha S. (1998): Application of renewable energy sources to develop rural tourism, EuroSun'98, Book of Proceedings, Vol. 1, Portoroz, Slovenia, 1998, p. I.3.8.
- 35.Buzás J., Farkas I., Biró A., Hegyi K., Lágymányosi A., Seres I., Seres E.E., Szűcs M. (1999): Napenergiahasznosító eszközök a mezőgazdaságban. MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXIII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 1999. jan. 19-20, 2. kötet, p. 155-159.
- 36.Farkas I., Buzás J., Hegyi K., Fekete M., Predescu M., Bartha S. (1999): Use of PV-hydro-wind hybrid system in rural tourism, Proceedings of the Conference on Energy and Agriculture towards the Third Millenium, AgEnergy'99, Athens, Greece, June 2-5, 1999. Vol. II, p. 574-581.
- 37.Hegyi K., Farkas I. (2000): Megújuló energiaforrások alkalmazása a vidékfejlesztésben, MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXIV. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2000. jan. 18-19, 2. kötet, p. 160-163.
- 38.Lágymányosi A., Farkas I., Kalmár I., **Hegyi K.** (2000): Installation conditions of a PV-wind hybrid system. 6th Workshop on Energy and Environment, Gödöllő, Hungary, October 9-10,2000. p.9.
- 39. **Hegyi K**. (2001): Levegő munkaközegű napkollektorok mezőgazdasági alkalmazásai. MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXVI. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2001. jan. 23-24
- 40. Hegyi K., Farkas I. (2002): Szoláris folyadék viszkozitásának vizsgálata, MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXVI. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2002. jan. 15-16, 2. kötet, 211-215. o.
- 41. Judák E., Korzenszky P., Hegyi K. (2002): Vékonyrétegű halmazok hővezetési

tényezőjének meghatározása. Ifjú Műszakiak Konferenciája, Kolozsvár, 2002. márc. 22-23.

- 42. **Hegyi K**. (2002): Folyadékos napkollektorok hőhordozó közegének fizikai vizsgálata. Tájvédelmi Napok, Mezőtúr. 2002.
- 43.**Hegyi K.** (2003): Szolárfolyadék anyagi paramétereinek vizsgálata fizikai módszerekkel, MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXVII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2003. jan 21-22, 3. kötet, 156-160. o.
- 44.Farkas I., Buzás J., **Hegyi K.,** Bartha S., Teodoreanu, D.I. (2003): Modelling and simulation of a solar thermal system with Matlab/Simulink, Research Report, Department of Physics and Process Control, Szent István University Gödöllő, No 32, October 2003.
- 45. **Hegyi K.** (2003): Napenergia a mezőgazdaságban (szerk.: Farkas I) (könyvrészlet), Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2003. ISBN 963 9358 91 6.
- 46.Farkas I., Hegyi K., Seres I., Buzás J., Géczy-Vígh P. (2003): Education and research at the Department of Physics and Process Control, Szent István University Gödöllő, Hungary, Proceedings of the International scientific Conference on Research and Teaching at Departments of Physics in the Context of University Education, Nitra, Slovakia, June 4, 2003, p. 5-11.
- 47. Hegyi K. (2004): Szolárfolyadék termodinamikai paramétereinek vizsgálata, MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXVIII. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2004. jan. 20-21, 4. kötet, 359-362. o.
- 48. Hegyi K. (2005): Folyadékos napkollektorokok hőhordozó közegének és áramlási jellemzőinek vizsgálata, MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXIX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2005. jan. 18-19, 3. kötet, 99-102. o.
- 49. **Hegyi K.** (2006): A hőhordozó közeg anyagi paramétereinek hatása a folyadékos napkollektorok működésére, MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXX. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2006. jan. 24, 3. kötet, 116-119. o.
- 50. **Hegyi K.** (2007): Folyadékos napkollektor modellezése a hőhordozó közeg paramétereinek alapján, MTA Agrár-Műszaki Bizottság, XXXI. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás, Gödöllő, 2007. jan. 23, 3. kötet, 95-98. o.
- 51. **Hegyi,** K., Farkas, I., Bartha,S (2007): Measuring Approch of Thermodynamical Parameters of Solar fluid, Revista Electrotehnică, Electronică, Automatică, Vol. 55, Nr. 3-4-2007. Pag 27-29.

M3: A dolgozatban használt approximációs módszerek

a. GAUSS - féle legkisebb négyzetek módszere

Legyen f(x) egy függvény, $x_1, x_2, ..., x_n$ pedig alappontoknak egy sorozata. Ezekben a pontokban $f(x_i)$ értékeiről megfigyeléseink vannak $(y_1, y_2, ..., y_n)$. Legyenek $\varphi_0(x), \varphi_1(x), ..., \varphi_m(x)$ legalább az x_i alappontokban értelmezett függvények, amelyekről feltesszük, hogy lineárisan függetlenek, vagyis ha $\sum_{k=0}^{m} c_k \varphi_k(x_i) = 0$, (i = 0, 1, ..., n), akkor $c_0 = c_1 = ... = c_m = 0$.

Célunk az $f(x_i)$ értékeket a $\varphi_k(x)$ függvények egy $\phi(x) = \sum_{k=0}^{m} c_k \varphi_k(x)$ lineáris kombinációjával megközelíteni, ahol a c_k együtthatókat abból a feltételből határozzuk meg, hogy a $\sum_{i=1}^{n} [f(x_i) - \phi(x_i)]^2$ négyzetösszeg minimális legyen. Ezt a módszert a $c_0, c_1, ..., c_m$ együtthatók meghatározására a legkisebb négyzetek módszerének szokás nevezni [*Korn, 1975*].

b. Approximáció GRAM-SCHMIDT ortogonalizáció segítségével

A lineárisan független $1, x, x^2, ..., x^m$ rendszer ortogonizálása egy $x_1, x_2, ..., x_n$ pontsorozatra vonatkozólag $(n \ge m+1)$ a következőképpen történik. [*Móricz*, 1988]

Legyen $q_0(x) \equiv 1$. Tegyük fel, hogy valamely j(< m)-re $q_0(x), q_1(x), ..., q_j(x)$ -et már értelmeztük úgy, hogy

$$(q_k, q_l) = \sum_{i=1}^n q_k(x_i) q_l(x_i) = 0 \quad (k \neq l, 1 \le k, l \le j).$$

Keressük $q_{j+1}(x)$ -et a $q_{j+1} = \lambda_0 q_0(x) + \lambda_1 q_1(x) + ... + \lambda_j q_j(x) + x^{j+1}$ alakban, ahol $\lambda_0, \lambda_1, ..., \lambda_j$ paraméterek értékét abból a feltételből határozzuk meg, hogy $(q_{j+1}, q_k) = 0$ (k = 0, 1, ..., j) legyen.

Az indukciós feltevés szerint $(q_{j+1}, q_k) = \lambda_k(q_k, q_k) + (x^{j+1}, q_k)$.
Ezért ha $\lambda_k = -\frac{(x^{j+1}, q_k)}{(q_k, q_k)} = -\frac{\sum_{i=1}^n x_i^{j+1} q_k(x_i)}{\sum_{i=1}^n q_k^2(x_i)}$ (k = 0, 1, ..., j)

Feltevésünk szerint $q_k(x)$ fokszáma $k \le m-1$, így nem válhat zérussá az *n* számú alappont mindegyikében, tehát $(q_k, q_k) \ne 0$.

Ezek után a $q_k(x)$ -eket egy adott f(x)-et a legjobban közelítő $\phi(x) = \sum_{k=0}^{m} c_k q_k(x)$ polinom meghatározása a következőképpen történik:

$$c_{k} = \frac{(f, q_{k})}{(q_{k}, q_{k})} = \frac{\sum_{i=1}^{n} f(x)q_{k}(x_{i})}{\sum_{i=1}^{n} q_{k}^{2}(x_{i})} \qquad (i = 0, 1, ..., m).$$

$$\delta_{m}^{2} = (f, f) - \sum_{k=0}^{m} c_{k}^{2}(q_{k}, q_{k}) = \sum_{i=1}^{n} f^{2}(x_{i}) - \sum_{k=0}^{m} c_{k}^{2} \sum_{i=1}^{n} q_{k}^{2}(x_{i}).$$

Nagyon fontos, hogy c_k -k nem függnek *m*-től. Ha tehát *m*-et *m*+*1*-re változtatjuk, akkor az *m*+*1*-re vonatkozó megoldás előállításához csak $c_{m+1} = (f, q_{m+1})/(q_{m+1}, q_{m+1})$ értékét kell kiszámítani.

Ha azonos alappontok esetén sok f(x) függvényhez kell megkeresnünk a négyzetesen legjobban közelítő, legfeljebb *m*-edfokú polinomot, akkor a $q_k(x)$ ortogonális polinomokat érdemes táblázatba foglalni. Például, a páratlan számú $x_i = i; (i = -l, -l+1, ..., -1, 0, 1, ..., l)$ ekvidisztáns alappont esetében az első néhány un. Gram-polinom a következő lesz:

$$\begin{split} q_0(s) &\equiv 1, \\ q_1(x) &= \frac{s}{l}, \\ q_2(s) &= \frac{3}{l(2l-1)} \left(s^5 - \frac{l(l+1)}{3} \right), \\ q_3(s) &= \frac{5}{l(l-1)(2l-1)} \left(s^3 - \frac{3l^2 + 3l - 1}{5} s \right) \\ q_4(s) &= \frac{35}{2l(l-1)(2l-1)(2l-3)} \left(s^4 - \frac{6l^2 + 6l - 5}{7} s^2 + \frac{3l(l^2 - 1)(l+3)}{35} \right) \\ q_5(s) &= \frac{63}{2l(l-1)(l-2)(2l-1)(2l-3)} \left(s^5 - \frac{5(2l^2 + 2l - 3)}{9} s^3 + \frac{15l^4 + 30l^3 - 35l^2 - 50l + 12}{63} s \right). \end{split}$$

M4: A hő-transzportegyenletet megoldó program szerkezeti felépítése

Az alábbiakban egy a hengerkoordináta rendszerben felírt 4 blokkból álló fizikai probléma numerikus megoldására fejlesztett kód részletes ismertetése látható.

Az alábbiakban a Borland Buildert használtuk a feladat megoldás eszközeként. Először az a program részlet kerül részletes elemzésre, ami egy nyomógombhoz hozzárendelt eseménykezelő függvény, aminek hatására a numerikus számítás elindul.

Az eseménykezelő neve: *TTest::cylindricalClick()*

void __fastcall TTest::cylindricalClick(TObject *Sender)
{ square_2D_geom T(5,0.000001,7000,2);
 long i,j,k;
 String fname;
 char *file name;

A fenti négy sorban definiálásra kerül, az osztály, ami tulajdonképpen a fizikai adatokat tartalmazza majd a számítás során, valamint a fizikai adatok kezelésére szolgáló összes függvény. A *square_2D_geom* osztály részletes definíciója az alábbiakban sorra kerül. Magának az osztálynak az a feladata, hogy rajta keresztül pontosan definiálható legyen a fizikai probléma geometriája, valamint az egyes blokkok peremfeltételei is ebben kerülnek megadásra.

*T.geometry_cyl[0].block_ini(1,30,20,0.01,0.01,30*0.01,20*0.01,0,30*0.01* +10*0.005,0.1,7.2,200.1,4121.1);

*T.geometry_cyl[1].block_ini(2,30,10,0.01,0.005,30*0.01,10*0.005,0,30*0.* 01,0.1,2.2,200.1,2411.1);

*T.geometry_cyl[2].block_ini(3,30,10,0.015,0.005,30*0.015,10*0.005,30*0* .01,30*0.01,0.1,5.2,200.1,121.1);

*T.geometry_cyl[3].block_ini(4,20,10,0.02,0.005,20*0.02,10*0.005,30*0.0* 15+30*0.01,30*0.01,0.1,2.2,200.1,1211.1);

*T.geometry_cyl[4].block_ini(5,30,30,0.015,0.01,30*0.015,30*0.01,30*0.0 1,0,0.1,5.2,200.1,121.1*);

// 0-Natural Boundary 1,2,...,n-ID Number of Boundary Blocks W-E-N-S // 0-Inner Side 1-First Kind (Dirichle) 2-Second Kind (Neumann) W-E-N-S

// lower left corner: x_start,y_start grid coordinates

// upper right corner: x_end,y_end grid coordinates

T.geometry_cyl[0].set_boundary_data(0,0,0,2,2,1,2,0,0,40,30,60); T.geometry_cyl[1].set_boundary_data(0,3,1,0,2,0,0,2,0,30,30,40); T.geometry_cyl[2].set_boundary_data(2,4,0,5,0,0,2,0,30,30,60,40); T.geometry_cyl[3].set_boundary_data(3,0,0,0,0,1,2,2,60,30,80,40); T.geometry_cyl[4].set_boundary_data(0,0,3,0,1,2,0,2,30,0,60,30);

T.find_block_grid();

T.geometry_cyl[0].create_grid(); T.geometry_cyl[1].create_grid(); T.geometry_cyl[2].create_grid(); T.geometry_cyl[3].create_grid(); T.geometry_cyl[4].create_grid_boundary(T.geometry_cyl); T.geometry_cyl[0].create_grid_boundary(T.geometry_cyl); T.geometry_cyl[1].create_grid_boundary(T.geometry_cyl); T.geometry_cyl[2].create_grid_boundary(T.geometry_cyl); T.geometry_cyl[3].create_grid_boundary(T.geometry_cyl); T.geometry_cyl[3].create_grid_boundary(T.geometry_cyl); T.geometry_cyl[4].create_grid_boundary(T.geometry_cyl);

// T_ini, T_up, T_down, T_left, T_right

T.geometry_cyl[0].initial_boundary_conditions(T.geometry_cyl,30,30,30,30,60);

T.geometry_cyl[1].initial_boundary_conditions(T.geometry_cyl,30,30,30,30,30,30);

T.geometry_cyl[2].initial_boundary_conditions(T.geometry_cyl,30,30,30,30,30,30);

T.geometry_cyl[3].initial_boundary_conditions(T.geometry_cyl,30,30,30,30,20);

T.geometry_cyl[4].initial_boundary_conditions(T.geometry_cyl,30,30,30,10,30);

fname="c:\\e.txt";
for(i=1,k=1;i<=T.max_time_step;i++)
{ for(j=0;j<T.number_of_blocks;j++)</pre>

```
{ T.geometry_cyl[j].linear_eq_coeff();
}
T.Gauss_Solver();
if((i%100)==0)
{ T.create_file_name(fname,k);
   file_name = new char[ T.get_str().Length() + 1 ];
   strcpy( file_name, T.get_str().c_str() );
   T.result_save_to_file(file_name);
   delete [] file_name;   k++;
   // ShowMessage(" Time iter step ");
  }
}
```

M5: A mérőpanel vezérlő és kiértékelő programja. (PCL-812 PG mérőpanel + PCLD 889 multiplexer)

```
uses
      Crt, Graph;
const
      PORT 889 : integer = $220
  EROSIT : real = 200
      CSATORNASZAM : integer = 5 ;
  TR : array[1..3] of real = ( 0.000000525792984, 0.00003860081243,
4.186486602e-08);
  TP : array[1..10] of real = (0.1238117795, 26861.17637, -896494.2879999999, -
46489260.88,
                                                     12441142450.0,
2275304922000.0, -639949686700000.0,
                                                    5.435757807e+16,
2.02361537e+18, 2.830121167e+19)
                                     :
var
      i, j, x : integer;
  gain : real ;
  D : array[1..5] of real
  T : array[1..5] of real
  TC : array[1..5] of real ;
  CJC : real ;
      F: Text
      grDriver: Integer;
      grMode: Integer;
      ErrCode: Integer;
function erosites : integer ;
begin
      if EROSIT = 1000 then erosites := 7
      if EROSIT = 200 then erosites := 6
      if EROSIT = 100 then erosites := 5
      if EROSIT = 50
                          then erosites := 4
      if EROSIT = 10
                          then erosites := 3
      if EROSIT = 2
if EROSIT = 1
                          then erosites := 2
                         then erosites := 1
      if EROSIT = 0.5
                         then erosites := 0
end
      ;
function ADkesz : Boolean
                                ;
var
                   : byte;
      bstatus
begin
```

```
bstatus := Port[PORT 889 + 5];
  if ( ( bstatus AND 16 ) = 16 ) then
        ADkesz := FALSE
  else
    ADkesz := TRUE
                          ;
end;
function hidegpont : real
                          ;
var
      bhivolt : byte;
      blovolt : byte;
  rhidegfok : real ;
begin
      Port[PORT 889 + 10] := 7;
      Port[PORT 889 + 12] := 0;
  repeat
  until ADkesz
  bhivolt := Port[PORT 889 + 5];
  blovolt := Port[PORT 889 + 4];
  rhidegfok := ( ( bhivolt * 256 + blovolt - 2048 ) * 5 ) / 2048
                                                               ;
      rhidegfok := rhidegfok * 1000 /24.4
  hidegpont := rhidegfok ;
end ;
function konvertalas(v:real):real
                                    ;
var
      v1, t1, t2 : real
                       ;
begin
      v1 := TR[1] + CJC * (TR[2] + CJC * TR[3]) + v
  t1 := v1 * (TP[6] + v1 * (TP[7] + v1 * (TP[8] + v1 * (TP[9] + v1 * TP[10]))))
      t2 := TP[1] + v1 * (TP[2] + v1 * (TP[3] + v1 * (TP[4] + v1 * (TP[5] + t1)))
))
  konvertalas := (t_2 * 100 + 0.5) / 100;
end
      ;
procedure meres;
var
      csatorna : integer
                        ;
      bhivolt : byte;
      blovolt : byte;
  rvolt : array[1..5] of real;
  ki : integer;
begin
      Port[PORT_889 + 10] := 0;
                                       { }
  gain := erosites * \$10;
```

```
for csatorna := 1 to CSATORNASZAM do
      begin
      ki := round(csatorna - 1 + gain);
            Port[PORT 889 + 13] := ki
                                            ;
            Port[PORT 889 + 12] := 0;
        repeat
      until ADkesz;
            bhivolt := Port[PORT 889 + 5]
            blovolt := Port[PORT 889 + 4]
    D[csatorna] := ((bhivolt * 256 + blovolt - 2048) * 5) / 2048;
    rvolt[csatorna] := D[csatorna] / EROSIT ;
  end;
  for csatorna := 1 to CSATORNASZAM do
      begin
      T[csatorna] := konvertalas( rvolt[csatorna] ) ;
      end ;
end;
procedure rajzbe;
begin
      grDriver := Detect;
      InitGraph(grDriver, grMode,");
end;
procedure rajzki;
begin
  CloseGraph;
end;
begin
      rajzbe;
      x := 0;
      Assign(F, 'MERES.TXT');
      Rewrite(F);
      repeat
      CJC := hidegpont ;
    for j := 1 to CSATORNASZAM do
    begin
            TC[j] := 0 ;
    end;
    for i := 1 to 1000 do
    begin
            meres;
      for j := 1 to CSATORNASZAM do
      begin
```

```
TC[j] := TC[j] + T[j]
       end;
    end;
    for j := 1 to CSATORNASZAM do
    begin
      write( F, TC[j] / 1000:5:1, ' ');
             write( TC[j] / 1000:5:1, '');}
{
             PutPixel(x, round (400 - TC[j] * 2 / 1000), 2 + j);
    end;
     writeln;}
{
    x:=x+1 ;
    writeln(F);
    delay(1000)
                  ;
  until keypressed ;
      Close(F);
  rajzki;
end.
```

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném mindazoknak a köszönetemet kifejezni, akik segítségükkel, támogatásukkal hozzájárultak, hogy ez a dolgozat elkészülhessen.

Témavezetőmnek, Dr. Farkas István professzornak köszönöm, hogy biztosította számomra a dolgozat elkészítésének feltételeit, a szakmai irányítást és a publikálási lehetőségeket.

Köszönöm Buzás János, dr. Géczyné Víg Piroska, dr. Seres István és dr. Zachár András kollégáimnak a szakmai és gyakorlati problémák megoldásában nyújtott segítségüket.

Köszönettel tartozom barátomnak és volt kollégámnak, dr. Balló Bélának bíztatásáért és a technikai feladatok megoldásában való segítségért. (Bár megérte volna!)

Valamint nem utolsó sorban köszönöm barátaimnak bíztatását és családomnak a türelmét.

Gödöllő, 2009. március

dr. Hegyi Károly