



Nyíregyházi Egyetem
Műszaki és Agrártudományi Intézet
Nyíregyháza



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**Cimbria szemestermény-szárító meleg oldali hőveszteségének vizsgálata,
elemzése kukorica szárításban**

Készítette: Palkovics Attila
Konzulens: Dr. habil. Antal Tamás PhD.

NYÍREGYHÁZA
2023

Tartalomjegyzék

Bevezetés és célkitűzés	1
1. A Szakirodalom elemző értékelése	3
1.1. A szemesztermény-szárítás veszteségeinek áttekintése	3
1.2. A hőátvitel elméleti áttekintése	6
1.2.1. A hővezetés (kondukción)	6
1.2.2. A hőáramlás (konvekcion)	7
1.2.3. A hőszugárzás (radiáción)	8
1.3. A szugárzási és a konvektív hőátadási tényezők kapcsolata	12
1.4. Konvekciós hőátadás állandósult állapotban	13
1.4.1. A Gr-szám	14
1.4.2. A Pr-szám.....	15
1.4.3. A Nu-szám	15
1.5. A „Jokiniemi-Ahokasz” tanulmány rövid bemutatása	16
1.6. Termográfia alapjai és gyakorlata	18
1.6.1. Az emisszió és a reflexiön közötti összefüggés.....	19
1.6.2. Termográfia a gyakorlatban	19
1.6.3. Az ϵ és RTC értékek meghatározása a gyakorlatban	20
2. Anyag és módszertan	22
2.1. A mérendő Cimbria AEG-18R szemesztermény-szárítón bemutatása	22
2.2. A mérés célja és metódusa	23
2.3. Az alkalmazott mérőműszerek és elemző szoftverek	24
2.3.1. Testoterm 4510 mérőműszer	24
2.3.2. Fluke Ti25 ipari hőkamera	25
2.3.3. Smartview Classic hőkép elemző szoftver.....	26
2.3.4. Air Humid Handling (AHH) szoftver	26
3. Mérési eredmények és azok kiértékelése	27
3.1. Energetikai ellenőrző műszaki felülvizsgálat	27
3.1.1. Cimbria gázfogyasztás alapú fajlagos hőfelhasználásának meghatározása	27

3.1.2.	Cimbria fajlagos hőfelhasználása Mollier-féle h-x diagram adatai alapján	29
3.2.	Helyszíni hőkamerás mérés és eszközkalibrálás	32
3.3.	Hőképek és elemzésük	34
3.3.1.	Hátfal elemzése	35
3.3.2.	Oldalfalak elemzése	38
3.4.	Teljes hőveszteség esztimációja	40
4.	Következtetések és javaslatok	43
5.	Összefoglalás	45
	Felhasznált irodalom.....	46

BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Magyarországon a termőterület jelentős részét a mezőgazdasági területek teszik ki, amelyek megoszlanak szántóföld, konyhakert, szőlő, gyümölcsös és gyepterületek között. 2021-ben a szántóterület több mint 2,4 millió hektár volt, főként gabona. A fő gabonafélék közül is az őszi búzát és a kukoricát vetették a legtöbbször, amelyek a teljes szántóterület 47%-át tették ki. Ha pedig a fő gabonafélék vetésterületét nézzük, akkor azt látjuk, hogy a kukorica 37,7%-kal igen jelentős szeletet hasít ki a képzeletbeli tortából.

A gabonafélék közül a kukoricának van a legmagasabb átlaghozama. A 2008-2018 közötti időszakban ez 6,2 t/ha volt. Lehetséges felhasználási területei között három kulcs szektort találunk: a takarmányozás, a bioüzemanyagok gyártása és az ipari alapanyag gyártás.

A terméshozamok mellett a beltartalmi érték a legfontosabb tényező az előállított termékek minősége szempontjából, mivel ez az alapja a magasabb feldolgozási fázisban előállítható minőségi termékeknek. A betakarított gabonát azonban természetesen be kell tárolni, mielőtt további feldolgozásra kerül. A megfelelő gabonátárolás feltétele a fentiekből adódóan a tárolás alatti fizikai, kémiai és mikrobiológiai folyamatok ellenőrzött szabályozása, ezáltal a beltartalmi értékek megőrzése és a romlást előidéző folyamatok megakadályozása. Ezen feltételek megteremtése a terményszárítás feladata.

A terményszárító berendezések több típusban, különböző kialakítással készülnek, de a szárítási folyamat fizikai alapelvei megegyeznek. A szemestermény-szárítás során a betakarított terményből a vizet felmelegített levegő segítségével vonják el. A levegő vízfelvevő képessége közel egyenes arányban nő a hőmérsékletének emelkedésével. A léghevítés másik hatása, hogy a gabonaszem felmelegedésével szemben a víz mozgási – diffúziós – sebessége a színhőmérséklettel exponenciálisan nő. Amikor a vízpárologtatáshoz szükséges energiát szárítóközeg segítségével közöljük a terménnyel, akkor konvekciós szárításról beszélünk.

A levegő felmelegítése hő bevitelével – jellemzően gázégő által szolgáltatva – valósul meg. Azonban – mint majd minden hőtechnikai folyamat – a szárítás is veszteségekkel jár, mely hatásfok csökkenésben is megnyilvánul. Az egyik ilyen hőveszteség a szárító berendezések felületi hővesztesége. A felmelegített szárító közeg a berendezés meleg oldalán – tehát a léghevítési oldalon – a hőmennyisége egy részét átadja a szemestermény-szárító burkolatának, amely veszteségként távozik a környezetbe. A fentiekből valószínűsíthető, hogy megtakarítás érhető el csupán azáltal, hogy eme felületi hővesztést szigetelések által redukáljuk. A kérdés itt csupán a veszteség mértéke, valamint gazdasági tervezési szempontok szerint az

esetleges beruházás megtérülésének hossza. Ez utóbbi természetesen csak úgy mutatható ki, ha maga a veszteség mérhető, számszerűsíthető.

A szakirodalmak elemzése során látható, hogy nagyon kevés helyen definiált a felületi hőveszteség mértéke, ezért felbukkan olyan metodika mely a hőveszteség meghatározását a hősugárzás általi hőleadásban adja meg. Más tanulmányban a hőátadás mértékének számítása hasonlósági egyenletek bevezetésével valósul meg.

Dolgozatomban bemutatom egy módját annak, hogy miként mérhető a hősugárzás általi hőveszteség. Ehhez a termográfia módszertanát használtam fel, hőkamerás vizsgálatokat végezve egy adott berendezés – Cimbria AEG-18R – működése során felületének megfigyelésével és speciális hőkamerás képek készítésével. Ezek a képek abban különlegesek, hogy elemző szoftver segítségével, a releváns paraméterek beállításával kiértékelhetők. A készült képeket vizsgálataim részeként elemeztem, feldolgoztam, majd a dolgozat kimeneteképpen kiszámoltam a hősugárzás által elvesztett hőmennyiségeket.

A dolgozatomban kísérletet teszek annak vizsgálatára és bemutatására is teoretikus síkon, hogy valóban megállja-e a helyét az az állítás, hogy nagyságrendileg a hősugárzás a hővesztés legrelevánsabb oka. Végül összefoglalom tapasztalataimat, az általam használt vizsgálati metodika limitációit és igyekszem azt is megfogalmazni, hogy milyen eljárások együttes használata mellett és feltételek teljesülése mentén lehet továbbfejleszteni a szárító berendezések ezen veszteségének vizsgálatát.

1. A SZAKIRODALOM ELEMZŐ ÉRTÉKELÉSE

1.1. A szemesztermény-szárítás veszteségeinek áttekintése

A kimutatható pénzügyi eredményesség érdekében fontos követelmény az ésszerű energiagazdálkodás. A szárítás energiafelhasználása és annak mértéke több tényező függvénye.

Ezeket a tényezőket a szakirodalom három csoportba osztja:

- a szárítás objektív körülményeit befolyásoló tényezők (pl: időjárási viszonyok, termés tulajdonságok),
- az üzemeltetési és technológiai körülmények által meghatározott jellemzők,
- a szárítási technológia.

Az időjárási jellemzők

A szemesztermény-szárító berendezések általában a környezeti levegővel közvetlenül érintkeznek és a környezetből szívott levegőt használják fel a szárítási folyamat során. Ennek folytán adódik, hogy a vízelvonó folyamat energiaigényét is jelentősen képes befolyásolni a hőmérséklet és a relatív nedvességtartalom. A ventilátorok által beszívott levegő egységnyi mennyiségének felmelegítését legfőképpen a szárítóközeg hőmérséklete határozza meg. A környezeti levegő hőmérsékletének csökkenése váltja ki leginkább az energiaszükséglet növekedését. (Antal, 2017).

A száradó anyag tulajdonságai

A vízelvonás hőigényére a szárítandó anyag tulajdonságai fejtik ki a legnagyobb hatást. A termények vízleadási képességei szerint vannak jól és rosszul száradó csoportok, de elmondható, hogy az intenzíven száradó fajták és hibridek gazdaságosan is száríthatóak. A jól és rosszul szárítható anyagok szárítási időtartamában 30-60% – os eltérés is adódhat, mely eltérés a rétegvastagsággal egyenes, míg a szárítóközeg hőmérsékletével fordítottan arányos. (Antal, 2017).

A kukorica szárítási szempontból nagyon hőérzékeny termények közé tartozik, ezért nagy figyelemmel kell lenni a szárítóközeg helyes megválasztására, melyet úgy kell beállítani, hogy a magvak maghőmérséklete 60°C-ot ne haladja meg. Az alkalmazott közeghőmérsékletet annak relatív nedvességtartalma is befolyásolja, ha magas a relatív nedvességtartalom, akkor

magasabb hőmérséklettel is lehet szárítani. A szárítóközeg sebességével kapcsolatban pedig alapvető kritérium, hogy ne haladja meg az anyagra jellemző lebegtetési sebesség határát. (Antal, 2017).

Termény nedvességtartalma

A termény kezdeti nedvességtartalma igen jelentős hatást gyakorol a hőigényre és így a fajlagos energiafelhasználásra. Természetesen, ha nagy nedvességű az anyag, akkor a víztartalmának elviteléhez nagyobb légmennyiségre is van szükség, mindemellett megnő a szárítás időtartama. Akkor a leggazdaságosabb a kukorica szárítása, ha a bejövő termény nedvességtartalma nagyságrendileg 20% körüli. Ahhoz, hogy ezt az értéket elérjük, olyan hibrideket kell vetnünk a megfelelő vetési időszakban, amelyek alacsony nedvességtartalommal takaríthatóak be, illetve ezt a nedvességet képesek könnyen leadni a szárítás során. (Antal, 2017)

Termény tisztasága

A szárítandó termény tisztasága is képes befolyásolni az energiafelhasználását. A szárítandó anyaghoz keveredett szennyezők (pl: levél, törtszem stb.) tisztítás hiányában képesek megnövelni a hőenergia-igényt akár 3-6%-al is. Elmondható, hogy a szárítandó termény tisztaságának 97-99% tisztaságúnak kell lennie. (Antal, 2017)

Szárított termény hűtése

A szárított termény hőmérséklete a szárítószakaszok végén elérheti a 60 °C-ot, azonban ezzel a hőmérséklettel betárolni nem szabad, ezért környezeti hőfokra való lehűtéséről gondoskodni kell. Ez a hűtés általi hőelvonás azonban hatalmas hőveszteségeket is jelenthet, ezért a modern szárítóknak a hővisszaforgatás elvével sikeresen felhasználhatóvá válik ez a hőmennyiség is. Az eddig kimutatott energiaköltség csökkenés, amely elérhetővé vált a recirkuláció hatására 25-35% körüli. (Antal, 2017)

Szárítandó anyag felmelegítése

A termény, a szárítás folyamata során felmelegszik, ami nagy hőmennyiséget igényel. Amennyiben a szárítandó termény őszi-téli kerül szárításra, úgy annak hőmérséklete is alacsonyabb lehet, amely tény és a fentiekben taglalt felmelegítéshez használandó hőigény igen jelentős hatást gyakorol az energiafogyasztásra.

A veszteségmentes vízelvonási folyamat így tehát az alábbi (1):

$$L(i_1 - i_2) - G_v c_{pv}(t'_1 - t'_2) - G_s c_s(t'_1 - t'_2) - m_b c_b(t_{be} - t_{ki}) = 0 \quad (1)$$

Tényezőkre bontva az egyenletet ezt láthatjuk:

$L(i_1 - i_2)$ tényező: vízpárolgatatás, ami a hasznos teljesítmény

$G_v c_{pv}(t'_1 - t'_2)$ tényező: víz felmelegítése (Q_1 veszteség)

$G_s c_s(t'_1 - t'_2)$ tényező: száraz anyag felmelegítése (Q_2 veszteség)

$m_b c_b(t_{be} - t_{ki})$ tényező: berendezés felmelegítése (Q_3 veszteség)

Ami azt jelenti, hogy van három veszteségünk az egyenletben: Q_1 ; Q_2 ; Q_3

A valóságban van egy Q_h hőveszteség is, mely a szárító és a környezet közötti hőtranszportból ered, így az összes hőveszteség (Q_v) (2):

$$Q_v = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_h \quad (2)$$

(Beke, 1994)

Felületi hőveszteség

A felületi hőveszteség szempontjából is igen fontos tényező a környezeti hőmérséklet. Az év végi hónapokban, avagy hidegebb időben végzett szárítás növeli a felületi hőveszteséget. Ez a 2-5%-os többlet hőmennyiség igény a szárítóberendezések szigetelésével mérsékelhető. (Antal, 2017)

A felületi hőveszteség mértéke és jellege több szakirodalomban is megjelenik, így néhány megállapítás ezekből:

„A felületen a környezetnek átadott hőmennyiség hőszigeteléssel mérsékelhető, azonban a művelet sikeressége a szárító konstrukciós kialakításától függ. Eredmény elsősorban a magas hőmérsékletű közeg vezetésére kiképzett szerkezeti elemek (meleglevegő csatornák) szigetelésétől várható. A szemettermény – szárítóknál a meleglevegő – csatornák hőszigetelése átlagosan 2-4% hőigénycsökkenést eredményez.” (Beke, 1997)

„A veszteségek pótlására fordított hőmennyiség, amely jó közelítéssel megegyezik a sugárzással leadott hőmennyiséggel (Q_s) (3):

$$Q_s = A_1 C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ (kJ)} \quad (3)$$

A_1 – a sugárzó felület nagysága (m^2)

$C_{1,2}$ – sugárzási állandó (3,968)

T_1 – a gép sugárzó felületének hőmérséklete (K)

T_2 – a gépet körülvevő levegő átlagos hőmérséklete (K)” (Barótfi, 1993)

„A kapott mérési eredmények a szárító hőteljesítményének 5-9%-át jelentik. A tényleges energiafogyasztás mérések gyakorlati körülmények között azonban 16-21% energia-megtakarítást jeleztek a szigetelt szárító esetében a szigetetlen referenciához képest, ha a fajlagos energiafogyasztást (kWh/kgvíz) vettük figyelembe.” (Internet 1.)

1.2. A hőátvitel elméleti áttekintése

Ha két különböző hőmérsékletű tér vagy test érintkezik egymással, akkor a Termodinamika II. főtétele értelmében a hőmérséklet különbség okán a hő a magasabb hőmérsékletű helyről az alacsonyabb felé adódik át. Tehát a rendszer kiegyenlítődésre, egyensúlyra törekszik. Ez a kiegyenlítődési folyamat a hőközlés. A hőközlést hívják hőátszármaztatásnak, hőátvitelnek vagy hőtranszportnak is.

A hő három különböző módon juthat el a tér egyik részéről a másikra, melyek az alábbiak:

- hővezetés
- hősugárzás
- hőszállítás (Beke, 1994)

1.2.1. A hővezetés (kondukción)

A hővezetés vagy más néven *kondukción* azon alapszik, hogy a test egyes részecskéi szoros kapcsolatban állnak egymással. A magasabb hőfokú, nagyobb energiával rendelkező részecskék energiájukat átadják a szomszédos, azonban kisebb energiával rendelkező

részecskének, ez a folyamat a hőfok kiegyenlítődésig tart. Elsősorban a szilárd testekre jellemző, de igaz lehet nyugalomban lévő gázok és folyadékok esetére is.

A hővezetés elengedhetetlen feltétele egy adott test vagy térfogat különböző pontjaiban fennálló hőmérsékletkülönbsége. Innen kimondható, hogy hővezetés hatására létrejövő hőáram nagysága függ az adott test hőmérséklet-eloszlásától.

Fontos fogalmak még: az *izoterma*, amely az azonos hőmérsékletű pontok mértani helyét jelenti, illetve a *hőmérsékleti gradiens*, amely a hőfokváltozás intenzitásának mértéke, amely vektormennyiség, s mint ilyen nagysága és iránya is van. A hőáram tehát csak akkor lép fel, ha a test egyetlen pontjában sem nulla a hőfokgradiens, ekkor a hő áramlása a hőfokesés irányával egybe esik. A hő tehát az izotermikus felületre merőlegesen áramlik. Az izotermikus felületen egységnyi idő alatt áthaladó hő a hőáramsűrűség (q , W/m²). (Beke, 1994)

Fourier tapasztalati törvénye szerint határozzuk meg a hőfokkülönbség következtében meginduló hőáram nagyságát, mely szerint egységnyi időre és felületre vonatkoztatva azt kapjuk, hogy a fajlagos hőáram (q) a negatív hőfokgradienssel arányos (4):

$$q = \lambda(-grad\ t) \quad (4)$$

A λ (W/mK) arányossági tényező, amely a test hővezetési képességére jellemző, skaláris mennyiség. Neve: hővezetési tényező. (Beke, 1994)

A hővezetési tényező tehát megadja az izotermikus felületre merőleges 1 m vastagságú réteg, 1 m² felületén egységnyi idő alatt, 1 K hőmérsékletű különbség hatására, vezetéssel átáramoltatott hőmennyiséget. A hővezetési tényező így tehát anyagi jellemző. (Beke, 1994)

1.2.2. A hőáramlás (konvekció)

A konvekció esetében a hőterjedése oly módon jön létre, hogy egyrészt hővezetés útján az áramló gáz vagy folyadék részecskéi között, valamint maga az áramlás következtében is adódik át hő. A közeg mozgását okozhatja külső erő, ekkor kényszerített áramlásról beszélünk, avagy természetes sűrűségkülönbség, vagyis természetes áramlás. A mérnöki megoldásokban legtöbbször félempirikus, kísérleti eredmények útján születnek megoldások adott feladatokra. Amikor a hőátadás egy szilárd felület és a vele érintkező közeg között játszódik le, a hőáram egyszerűen számítható a hőátadás alapegyenletével, amelyet Newton- féle lehűlési törvénynek is nevezünk (5):

$$Q = \alpha A \Delta t \text{ (W)} \quad (5)$$

α – hőátadási tényező (W/m²K)

A – a hőátadó felület nagysága (m²)

Δt – a felület és az áramló közeg hőmérséklete közötti különbség (K)

Az α tényezőt hőátadási tényezőnek nevezzük. Azonban fontos, hogy ez nem anyagi jellemző, hanem függ a felület geometriájától, az áramlás jellegétől és a közeg fizikai jellemzőitől.

A konvektív hőátadás központi problémája mindig a hőátadási tényező meghatározása. (Wong, 1983).

1.2.3. A hősugárzás (radiáció)

A hőterjedés egy olyan speciális formája a hősugárzás, amely nem igényel közvetítő közeget, mivel önmaga elektromágneses sugárzás.

Az elektromágneses sugárzások hullámhosszuk szerint osztályozhatók. A legrövidebbek a 10⁻¹⁵ hullámhosszú kozmikus sugarak, melyeket gammasugarakként ismerhetünk és radioaktív folyamatok során keletkeznek. A legnagyobb hullámhosszúak a 10⁸ hullámhosszú, úgynevezett rádióhullámok. A szakirodalmak szerint minden elektromágneses sugárzásnak van hőhatása, azonban a valós tartomány meglehetősen szűk és valójában csak az infravörös sugarak tartományát öleli fel, ahol a hullámhossz kb. 10⁻⁶-10⁻⁴ m.

A hősugárzás alapösszefüggése Joseph Stefan szlovén és Ludwig Eduard Boltzmann osztrák fizikusok által került meghatározásra, ezért a vonatkozó törvényt ma Stefan-Boltzmann törvénynek nevezzük, amely az adott felületegység által, adott idő alatt kisugárzott hőáramsűrűséget (q) adja meg (6).

$$q = \varepsilon C T^4 \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (6)$$

Ahol,

ε – sugárzó test feketeségi foka

C – abszolút fekete test sugárzási tényezője

T – a test felületi hőmérséklete (K)

Abszolút fekete testnek nevezzük azt a testet, amely minden ráeső sugárzást elnyel és folyamatos színek szerint – minden hullámhosszon – energiát sugároz ki. Az abszolút fekete test elméleti úton meghatározott sugárzási tényezője az úgynevezett Stefan-Boltzmann állandó (C) (7):

$$C = 5,67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \text{ K}^4\text{)} \quad (7)$$

Egy adott test feketeségi fokának nevezzük azt az értéket, amely megmutatja, hogy a test az abszolút fekete test sugárzókéességét milyen mértékben közelíti meg. Ebből az is adódik, hogy a test feketeségi foka mindig kisebb, mint maga az egység, tehát a Stefan-Boltzmann állandó. Egy adott test feketeségi foka több tényező függvénye. A legfontosabb ezek közül a felület érdessége és anyaga. A sima, fényes és kemény felületek kevés rájuk eső sugárzást nyelnek el, azonban a puha, fénytelen és érdes – diffúz – felületek jól megközelítik a fekete testet, mert sok rájuk eső sugárzást elnyelnek, jobban felmelegszenek és nagyobb is kisugárzásuk. Az is megállapított, hogy a közhiedelemmel ellentétben nem a szín meghatározó a feketeségi fok, azaz a kisugárzott és elnyelt hőáram tekintetében. (Író, 2010)

Fontos azonban még a hősugárzás kapcsán megemlíteni egy fontos tény, nevezetesen, hogy amikor a sugárzás egy felülettel találkozik, akkor a hullámok egy része visszaverődik, egy része elnyelődik és – ha átlátszó a test akkor – egy része áthatol rajta. Az energia-megmaradás törvénye okán azonban az energiák összege meg kell hogy egyezzen a beeső energiával:

$$\text{visszavert} + \text{elnyelt} + \text{áteresztett energia} = \text{belső energia}$$

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

ahol ρ a test visszaverő képessége (reflexiós tényezője), α a test elnyelő képessége (abszorpciós tényezője), τ a test áteresztőképessége (transzmissziós tényezője). Minden test – legyen szilárd vagy folyékony – folytonosan sugároz (emittál) energiát. A kisugárzott energia függ a test hőmérsékletétől és a sugárzó felület tulajdonságaitól. A valóságos felületről kisugárzott hőáramot (Q) a következő egyenlettel határozhatjuk meg (8):

$$Q = \varepsilon C A T^4 \text{ (W)} \quad (8)$$

ahol,

ε – sugárzó test feketeségi foka

C – abszolút fekete test sugárzási tényezője

A – felület (m²)

T – a test felületi hőmérséklete (K)

A legtöbb hősugárzással kapcsolatos probléma megoldásakor alapvető feladatunk, hogy meghatározzuk a sugárzási jellemzőket valóságos testek, avagy más szóval szürke testek esetében. (Wong, 1983)

Kényelmi okokból a Stefan – Boltzmann törvényt szokták úgy is felírni, hogy az állandó nagyságrendjét az abszolút hőmérséklet osztójába írják, így kisebb számokkal, kényelmesebben lehet dolgozni (9):

$$q = \varepsilon \times 5,67 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (9)$$

A sugárzó testek közötti hőcsere a Stefan – Boltzmann törvény szerint a két hőmérséklet negyedik hatványai közötti különbséggel arányos (10):

$$q = \varepsilon_{red} \times 5,67 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{1,2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (10)$$

Az összefüggésben ε_{red} a redukált feketeségi fok, amely a két felület feketeségi fokából határozható meg. A $\varphi_{1,2}$ pedig a két felület méreteiből és egymáshoz viszonyított helyzetéből meghatározott úgynevezett besugárzási tényező.

A besugárzási tényező, a redukált feketeségi fok meghatározása azonban igen bonyolult geometriai számításokat igényel. Van azonban két eset, amikor a besugárzás tökéletes, vagy közel tökéletes, tehát $\varphi_{1,2}=1$:

- a két felület párhuzamos, egymáshoz közel áll és kb. azonos méretű
- az egyik felülettel határolt test ('1') a másik test által alkotott zárt felületen ('2') belül helyezkedik el (11):

$$\varepsilon_{red} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (11)$$

Ha megfigyeljük a redukált feketeségi fok összefüggését, akkor azt láthatjuk, hogy azokban az esetekben, amikor a zárt tér felülete ('2') sokszorosán meghaladja a zárt térben lévő test felületét ('1'), akkor a környezet elviekben abszolút fekete testnek tekinthető, vagyis $\varepsilon_2 \approx 1$.

Ez abból adódik, hogy a nevezőben lévő második tag a zárt teret alkotó felület tényleges feketeségi fokától függetlenül közel esik a nullához ($A_1/A_2 \approx 0$). Ekkor behelyettesíthető a redukált feketeségi fok helyébe a zárt térben lévő test felületének feketeségi foka.

Nagyon fontos itt megjegyezni, hogy sugárzással átvitt hő általában csak akkor számottevő a hőátadással átvitt hő mellett, ha az adott hőmérsékletkülönbség több száz fok, illetve a hőleadó felület hőmérséklete eléri az 500-700 °C-ot. (Író, 2010)

Az egymást „látó” felületek egymásra energiát sugároznak. Ha egyensúlyi állapotot veszünk, akkor a nagyobb hőmérsékletű 1. felületről a kisebb hőmérsékletű 2. felületre átáramló energiamennyiség arányos a két felület hőmérséklete negyedik hatványának különbségével (12). (Garbai, 1988)

$$Q = A_1 C_k \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-2} = A_2 C_k \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{2-1} \quad (12)$$

ahol,

$C_k = \varepsilon C$ – emissziós tényezővel korrigált Stefan-Boltzmann állandó

Vegyük figyelembe, hogy ha a fenti képletben A_2 az abszolút fekete testnek tekinthető környezet, akkor elegendő csak az A_1 -el, mint a zárt térben lévő test tényezőivel számolnunk (lásd fentebb.) A $\varphi_{1,2} = 1$ feltétel is igaz, hiszen a sugárzó test a környezetben belül helyezkedik el.

A fentiek okán a test által környezetbe sugárzás útján távozó energia az alábbi összefüggés szerint írható fel (13).

$$Q = A_1 \tau \varepsilon C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi \quad (W) \quad (13)$$

ahol,

ε – sugárzó test feketeségi foka

C – az eredő sugárzási tényező

τ – az idő (h)

A – felület (m²)

T₁ – a melegebb – test – felület abszolút hőfoka (K)

T₂ – a hidegebb – környezet- abszolút hőfoka (K)

φ – normálishoz mért beesési szög

A hőáram (Q) teljesítmény jellegű mennyiség, mértékegysége a Watt. (INTERNET 5)

1.3. A sugárzási és a konvektív hőátadási tényezők kapcsolata

Fáy Áprád *Bevezetés a hősugárzás elméletébe* című könyvében (Internet 2) egy egyszerű számítási feladat segítségével bizonyítja be, hogy a hősugárzás tárgyát képező elektromos rezsó hőleadása milyen arányban van a sugárzás általi és konvektív hőáramok tekintetében. Azt találjuk ezen számítás eredményeképpen, hogy amikor a rezsó felületi hőmérséklete 512 °C és környezeti hőmérséklet 20 °C a hőáramok megoszlása az alábbi:

a konvekciós hőátadás: $q_{konv} = 2459 \text{ W/m}^2 = 16 \%$

a sugárzásos hőátadás: $q_{sug} = 12661 \text{ W/m}^2 = 84 \%$.

(forrás: INTERNET 2)

Az alapegyenlet felírható ebben a formában (14):

$$q = q_{konv} + q_{sug} \quad (14)$$

Megvizsgálta azt is, hogyan alakul a sugárzás és a konvekció hőáramok aránya a rezsó példára vetítve és az 1. táblázatban foglalt arányszámokat kapta.

1. táblázat: Sugárzás és konvektív hőáramok aránya a „rezsó példa” esetében

P W	T K	$t - t_K$ C°	q_{konv} %	q_{sug} %	A (2.25) közelítés hibája T-ben, %
500	785	492	16	84	166
100	505	212	35	65	29
50	424	131	43	57	11
20	355	62	52	48	3
10	326	33	55	45	1

(Forrás: Internet 2.)

A táblázatból azonban egy dolog rögtön észrevehető, mégpedig az, hogy 33 °C hőmérsékletkülönbség esetén nagyságrendileg fele-fele a sugárzással leadott hőáram és a konvektív hőátadás aránya. Ez azonban némileg pontosítja jelen dolgozat 1.1. fejezetében idézett megállapítást, miszerint nagyságrendileg egyező a sugárzással leadott hő a berendezés veszteségeinek pótlására fordítandó hőmennyiséggel.

Az is látható még a táblázatból, hogy a közelítés hibája egyre nagyobb hőmérséklet különbségek felé haladva egyre nő, így $\Delta T = 62^\circ\text{C}$ esetén 3% a bemutatott esztimáció hibalehetősége. Fáy Árpád ennek okait számítógépes szimulációkkal ellenőrizte és könyvében részletesen bemutatja, illetve azt a megállapítást teszi, hogy a példa adatait tipikusnak tekinthetjük a környezetünkben lévő testek hőátadási viszonyaira. (Internet 2)

1.4. Konvekciós hőátadás állandósult állapotban

A hőátadási folyamatokban a hőáramsűrűség számítását alapvetően méréssel vagy számítással meghatározott hőátadási tényezőkre alapozzuk. Abban, hogy a hőátadási tényezőt meghatározzuk, fontos szerepe van a hasonlósági számoknak, amelyeket a hasonlósági elvek felhasználásával lehetővé teszik a mérési és számítási eredmények kiterjesztését, illetve ezek összekapcsolását.

Az energetikai berendezésekben lejátszódó hőtechnikai folyamatok igen bonyolultak, sok részfolyamat elméleti alapja még ma sem tisztázott. Emiatt a gyakorlati mérnöki munkában a számításokhoz használt méretezési összefüggések félig vagy teljesen empirikusak. A nagy pontosságot igényelő tervezési folyamatok velejárója a modellezés. A mérési eredmények és a modellkészítés általánosabbá tételének igénye hívta életre az analóg modellezést és a hasonlósági elméletet. A hasonlósági elvet a mérés elméletének tekinthetjük.

Azonban fontos tudni, sok esetben a hasonlóság vagy az analógia nem teljes, de ennek ellenére bizonyos esetekben a kapott eredmények a gyakorlatban kielégítő pontosságúak és használhatóak. (Garbai, 1988)

A hőátadás kapcsán tisztában kell lennünk azzal, hogy a kialakuló hőáram nagyságában szerepet játszik az, hogy az áramló kontinuumnak milyen anyagi jellemzői vannak (milyen a hővezetési tényezője), de emellett meghatározó jelentőségű az, hogy a kontinuum áramlása milyen: lamináris vagy turbulens. Lamináris áramlás esete közelebb áll a hővezetéshez, míg az intenzív keveredéssel járó turbulens áramlás esetén – amikor lehetséges, hogy a részecskék

mozgásuknak köszönhetően közvetlenül adjanak át hőt a szilárd test felületére – jóval nagyobb hőáramok alakulnak ki.

Ugyancsak megfigyelhető, hogy turbulens áramlás okozta intenzív keveredés miatt, ezekben az áramlásokban a szilárd test felületétől távolabb – a határrétegen kívül – gyakorlatilag mindenhol ugyanaz a hőmérséklet mérhető. Az áramló kontinuum és a szilárd test közötti hőátadás jelenségére Newton határozott meg egy összefüggést, ami a hőáramsűrűség összefüggése, ahol (15):

$$q = \alpha \Delta t (W/m^2) \quad (15)$$

Ezt a hőátadási tényezőt (α) és jelentőségét már bemutattam egy korábbi fejezetben, azonban fontos kiemelni ismét a hasonlósági egyenletek kapcsán, hogy nagyban befolyásolják mértékét az áramlás jellemzői, mely a Reynolds számtól (Re-szám) függ. Tehát a hőátadási tényező nem anyagi jellemző, meghatározása a kritériális egyenletek segítségével történik.

Az Re-szám által kifejezett hasonlóság mellett további hasonlósági feltételeknek is teljesülniük kell. Ezeket a hasonlósági feltételeket kifejező dimenzió – mértékegység – nélküli hasonlósági számok a következők:

- Grashof szám (Gr-szám)
- Prandtl szám (Pr-szám)
- Nusselt szám (Nu-szám)

(Író, 2010)

1.4.1. A Gr-szám

A Grashof-szám egy német mérnök Franz Grashof emlékét őrzi, amely szám nem más, mint a felhajtóerő és a súrlódási erő viszonyozása. Ebből következően a Gr-szám az áramlásra jellemző éppúgy, mint az Re-szám, de csak olyan áramlásokra jellemző, amikor az áramlás nem kényszerített, hanem a hőmérséklet különbség hatására alakul ki. Ebből következik, hogy az Gr-szám és az Re-szám sosem szerepel ugyanazon összefüggésben.

A Gr-szám definíciós összefüggése az alábbi (16):

$$Gr = \frac{\beta g \Delta t l^3}{\nu^2} \quad (16)$$

ahol:

β – a közeg köbös hőtágulási együtthatója

l – az áramlásra jellemző lineáris méret (pl: cső hossza)

ν – kinematika viszkozitás

Δt – az áramló kontinuumra jellemző hőmérséklet és a fal jellemző hőmérséklete közötti különbség, ahol a különböző anyagi jellemzőket a két szám számtani középértékének kell venni. (Író, 2010)

1.4.2. A Pr-szám

A Prandtl-szám Ludwig Prandtl német fizikus nevéhez fűződik, aki az aerodinamika úttörője volt. A szám maga a közeg anyagi jellemzőiből képzett szám, ezért sokszor anyagjellemző-számnak is szokták nevezni.

Számos olyan anyagjellemző táblázat létezik, amelyben megtalálhatóak közvetlenül a Pr-szám értékei a hőmérséklet függvényében.

A Pr-szám kiszámítására szolgáló összefüggés az alábbi (17):

$$Pr = \nu / a \quad (17)$$

ahol,

ν – kinematikai viszkozitás

a – a hővezetési tényezőt, a sűrűséget és fajhőt tartalmazza ($\lambda / (\rho c_p)$) (m^2/s)

(Író, 2010)

1.4.3. A Nu-szám

A Nusselt számot hőhasonlósági számnak is nevezzük, mely Wilhelm Nusseltről kapta nevét.

A kiszámítására szolgáló definíciós összefüggés (18):

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (18)$$

Ez a hasonlósági szám tartalmazza a keresett hőátadási tényező α értékét, l pedig az az adott hőátadási folyamatra jellemző geometria méret jelölésére szolgál.

A kísérletek alapján felállított kritériális egyenletek általános szerkezetű alakja (19):

$$Nu = CRe^m Gr^n Pr^p (l/d)^q \quad (19)$$

A Gr-szám kapcsán elmondottak szerint „m” vagy „n” közül az egyik mindig zérus. Kényszerített áramlás esetében az „n”, szabad áramlásban az „m”.

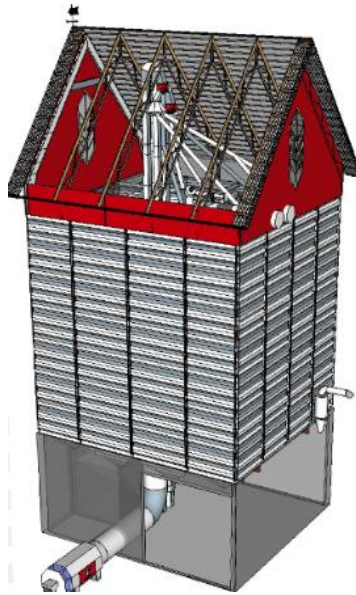
A hőátadási tényező meghatározásának menete tehát:

- az adott áramlás és a probléma esetében el kell dönteni, hogy Re-szám vagy Gr-szám mértékadó,
- el kell dönteni, hogy mi a vonatkoztatási, jellemző hőmérséklet,
- táblázatok alapján meg kell határozni az anyagjellemzőket a vonatkoztatási hőmérsékleten,
- meg kell határozni az egyenlet jobb oldalán található hasonlósági számokat,
- ki kell keresni szakirodalmak felhasználásával az esetre jellemző kritériális egyenletet és meg kell határozni a Nu-számot,
- majd a Nu számból ki kell számítani a hőátadási tényezőt.

(Író, 2010)

1.5. A „Jokiniemi-Ahokas” tanulmány rövid bemutatása

A Helsinki Egyetem kutatói Tappani Jokiniemi és Jukka Ahokas jegyeznék egy tanulmányt (Internet 1), melyet 2014-ben készítettek, amelyben mind mérés útján, mind pedig teoretikus úton elemezték egy szárítóberendezés hőveszteségét, illetve a fal oldali szigetelés hatását az energia felhasználásra. Az egyik vizsgálat alá vont szárítóberendezés egy Antti Agrosec 43MF2 volt, amely egy finn fejlesztés nyomán szárítóházba van szerelve (1. ábra).



1. ábra: Antti – féle szárítóház megoldása
(Forrás: Internet 7.)

A másik berendezés egy, az előzővel megegyező gyártmányú és típusú szárító volt, azonban ez a hagyományos – szigeteletlen – megoldásban. Mindkét berendezés teljesítményét, hűtőlevegő recirkulációját tekintve azonos volt, tehát jó lehetőséget biztosított a valós adatokon alapuló energetikai elemzés biztosítására.

A mérési módszerben alkalmazott teoretikus megközelítésben vizsgálták termográfia segítségével a felület hőmérsékletét, illetve ezzel párhuzamosan becsülték a hőszugárzással elvesztett hőt, valamint hasonlósági egyenletekkel számították a konvektív hőátadási tényezőt, majd ebből a kalkulálták konvektív hőveszteséget.

A hasonlósági egyenletekben, először meghatározták a Rayleigh (Ra_L) számot (20), amely a Grashoff és Prandtl szám szorzata, majd ezt felhasználva számították a Nusselt számot (21), amiből pedig már adódott a hőátadási tényező (22). Ennek segítségével, illetve a termokamerával mért felületi hő segítségével pedig már ki tudták számolni a hőveszteséget, adott környezeti feltétel mellett (23).

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (20)$$

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (21)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad (22)$$

$$q = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \quad (23)$$

A számításokhoz szükséges koefficienseket különböző táblázatokból emelték át, így például a 20. egyenlethez szükséges kinematikai viszkozitás (ν) értékét a levegő adott hőmérsékletének megfelelően kerültek meghatározásra.

A tanulmány eredményei azt mutatták, hogy a sugárzás általi hőveszteség a vizsgált berendezésnél 8kW volt, míg a hasonlósági egyenletekkel összesen 14 kW adódott. A szigetetlen szárítóberendezésnél ez az érték 12 kW volt, melyet a hőáram-érzékelők segítségével mértek. Ezek a számok a vizsgált szárító hőteljesítményének 5-9%-át tették ki nagyságrendileg. Azonban a fajlagos eredmények – kWh/kg elpárolgott víz – tekintetében 16-21%-ot mértek. (INTERNET 1)

1.6. Termográfia alapjai és gyakorlata

A hőkamerák a hosszú hullámú infra sugárzást mérik a látómezejükben. Ez alapján számítja ki az eszköz a mérni kívánt felület hőmérsékletét. A számítás a mért felület emissziós tényezőjének (ε) és a reflektált hőmérsékletének (RTC = Reflected Temperature Compensation) figyelembe vételével történik. A kamerák egy részében ezek az értékek már beállíthatóak, más esetekben – leginkább az RTC érték vonatkozásában – utólagos szoftveres korrekciót igényelhetnek. A detektor minden pixele egy-egy hőmérsékleti pontot jelent a gyakorlatban, amely a kijelzőn valótlán színű pontként jelenik meg. Tehát a termográfia valójában egy passzív, érintésmentes mérési eljárás. A hőfelvételen a mérendő objektum felületének hőmérséklet-eloszlását jeleníti meg. (INTERNET 3)

1.6.1. Az emisszió és a reflexió közötti összefüggés

Ahogy az jelen dolgozat 1.2.3. fejezetében részletesen bemutattam, nagyon fontos, hogy az emissziós tényező és a reflexió – a transzmisszióval kiegészülve – az energia megmaradás törvényét követi. A gyakorlatban azonban a transzmisszió ritkán fordul elő, ezért ez elhanyagolható. Ennek értelmében fontos, hogy a termográfiai mérések során – avagy ezek elemzésekor – jól állítsuk be az emissziós tényező értékét, illetve a reflexiót.

Összességében elmondható a fentiek okán néhány alap összefüggés az emisszióval kapcsolatban. Tehát minél alacsonyabb az emisszió:

- annál magasabb a visszavert infravörös sugárzás mértéke,
- annál nehezebb pontos hőmérsékletmérést végezni
- annál fontosabb az RTC kompenzációjának beállítása.

Alacsony emissziós tényezőjű testek ($\varepsilon \leq 0,6$) értékkel rendelkeznek, hőmérsékletük mérhető hőkamerával, azonban az eredményeket meg kell vizsgálni. Különösen akkor döntő jelentőségű az emissziós tényező megfelelő beállítása, amikor nagy a különbség a mérés tárgyának hőmérséklete és a környezet hőmérséklete között. Amennyiben a mérendő tárgy hőmérséklete magasabb, mint a környezeti hőmérséklet, úgy a túl magasra beállított emissziós tényező túl alacsony kijelzett hőmérsékletet eredményez, a túl alacsonyra beállított emissziós tényező pedig túl magas hőmérsékletet mutat a kijelzőn. (INTERNET 3)

1.6.2. Termográfia a gyakorlatban

A mérésre a tárgyak emissziós és reflexiós képességén kívül még nagy hatással van, a felület, a környezet, az időjárás és levegő különböző feltételeinek vagy paramétereinek változása, hatása.

A Környezet

Annak érdekében, hogy a mérés során a hőkamera a mérendő tárgy felületének hőmérsékletét pontosan kiszámíthassuk, lényeges, hogy az emissziós tényező (ε) beállítása mellett a visszavert/reflektált hőmérséklet (RTC) beállítását is elvégezzük. A legtöbb mérés során a visszavert hőmérséklet megegyezik a környezeti hőmérséklettel. Környezeti hőmérsékletet egy

levegő hőmérsékletmérővel lehet elvégezni. Az emissziós tényező pontos beállítása különösen fontos, ha a mérés tárgya és a mérés környezete közötti magas a hőmérséklet különbség!

A kültéri termográfiának van néhány speciális tulajdonsága. A tiszta égboltból hideg, diffúz égi infravörös sugárzás érkezik. Tiszta égbolt esetén a „hideg diffúz égi sugárzás” ($\sim -50\text{ °C} \dots -60\text{ °C}$) és a meleg napkisugárzás ($\sim 5500\text{ °C}$) egész nap visszaverődik. Az égbolt felületének nagysága meghaladja a napét, így a visszavert hőmérséklet külső termográfia esetén napos időben is általában 0 °C alatt van. A tárgyak pedig a nap sugárzásának elnyelése révén felmelegszenek. Ez a tény nagymértékben befolyásolja a felületi hőmérsékletet. Éppen a fentiek okán kerülni kell a direkt napsugárzást és lehetőség szerint borús időben kell mérni, mert leárnyékolja a hideg, diffúz égi sugárzást. Figyelemmel kell lenni saját testünk infravörös sugárzására is, amely képes reflektálódni a hidegebb felületről. (INTERNET 3)

Időjárás

Az erős csapadék avagy hó megváltoztathatja a mérés eredményét. A víz, a jég és a hó emissziója magas, ezért nem engedik át az infravörös sugarakat. A nedves tárgyak mérési hibáinak főbb oka a felület párolgása következtében bekövetkező hűtése. (INTERNET 3)

Levegő

A sűrű köd is képes befolyásolni a mérést, mivel a vízcseppek kevesebb infravörös sugarat engednek át. A szél szintén befolyásolhatja a hőkamerával végzett mérést. A konvekció következtében a felület közelében lévő levegő a mérés tárgyával azonos hőmérsékletű. A légáramlás azonban ezt a légréteget képes „elfújni”, majd elmozgatni ezt a hőt és elvinni olyan felületre, amelynek a hőmérséklete hidegebb, ezáltal torzítani a mérési eredményt.

A levegő egyéb szennyezői – por, korom, füst – magas emisszióval rendelkeznek, ezért maguk is infravörös sugárzást bocsátanak ki, amelyet a hőkamera felvesz. (INTERNET 3)

1.6.3. Az ε és RTC értékek meghatározása a gyakorlatban

A mérendő tárgy felületi emisszióját meg lehet határozni emissziós tényező táblázatokból (amelyek csak irányadók), kontakt hőmérővel végzett összehasonlító méréssel, avagy hőkamerás összehasonlító méréssel.

Az ϵ érték meghatározása

A kontakt hőmérővel végzett módszer esetében először megmérjük a mérendő tárgy felületét, majd ezt követően ugyanezen felületet megmérjük hőkamera segítségével is, úgy hogy az emissziós tényezőt 1 értékre állítjuk. Az emissziós tényező értékének folyamatos csökkentésével addig módosítjuk a hőmérsékletet, míg az azonos nem lesz a felületi hőmérő által mért hőmérséklettel. Az ekkor beállított emissziós tényező a mért felület emissziós tényezője.

A hőkamerával végzett mérésnél először fel kell ragasztani egy darab emissziós szalagot a mérendő tárgyra. Kis idő elteltével a mérendő tárgy felületének hőmérsékletét megmérhetjük a hőkamerával a leragasztott részen, a szalaggal beállított emissziós tényezőjével. Ez lesz a referencia hőmérséklet. Lépésenként állítani kell az emissziós tényezőt, mindaddig, míg a hőkamera a mérendő tárgy felületének le nem ragasztott részén ugyanazt a hőmérsékletet nem méri, mint az előbbi referencia hőmérséklet. Az így beállított emissziós tényező a mérendő tárgy felületének egzakt emissziós tényezője. (INTERNET 3)

Az RTC érték beállítása

Amennyiben minden a mérést befolyásoló zavarforrást kiküszöböltünk, akkor a visszavert infravörös sugárzás hőmérséklete megegyezik a környezeti hőmérséklettel. A környezeti hőmérsékletet meghatározhatjuk egy levegő hőmérsékletmérő műszerrel és ennek megfelelően rögzíthetjük az RTC értéket a hőkamerában. Amennyiben azonban a mérés környezetében vannak még infravörös sugárforrások, a pontos mérési eredmény biztosítása okán a reflektált hőmérsékletet meg kell határozni. Erre alkalmas a Lambert sugárzó. (INTERNET 3)

A Lambert sugárzó egy olyan tárgy, mely a rá irányuló sugárzást ideálisan – diffúz módon – minden irányban egyenlő erősséggel veri vissza.

A Lambert sugárzón tehát hőkamerával mérhetővé válik a reflektált sugárzás hőmérséklete. Egy összegyűrt, majd ismét kisimított alufóliával jól helyettesíthető a Lambert sugárzó. Az alufólia reflexiós tényezője magas, az összegyűrés miatt, pedig diffúz módon verődik róla a sugárzás.

2. ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

2.1. A mérendő Cimbria AEG-18R szemestermény-szárító bemutatása

A vizsgált berendezés a Vetőmag és Szárító kft tulajdonát képezi. A szárító 2002-ben került telepítésre és az IKR Rt helyezte üzembe. A telepített berendezést AEG-14R típuszámon adták át, akkor még 14 szekcióból (szakaszból) épült fel. Majd 2008-ban a cég további igénynövekedésének hatására felülvizsgálták a fejlesztési lehetőségeket a gépgyártóval. Az átépítés eredményeképpen a szárító további négy szakasszal bővült, valamint a Ciklofan ventilátor rendszer hangtompítókát kapott, így új néven – AEG-18R – elnevezéssel lett átadva a módosított berendezés. (2. ábra)

A Cimbria típuskódolásában az AEG az alábbi jelölést jelenti:

A: 3400 mm szélességű

E: közvetlen olaj- vagy gázfűtéses levegő (égéstér) füstgázzal keverve

G: horganyzott acéllemez kialakítással.

(forrás: Cimbria gépkönyv)

A szárító Midco MA 150 szőnyegégővel van felszerelve, illetve 3 db ACG varifan szabályzású axiálventilátor gondoskodik a szárító levegőmennyiség-szabályozásáról, illetve 2 db CF20-as ciklofan biztosítja a visszavezetett levegőmennyiséget. A 3-as felső ciklofan ACG1220-8-as jelzésű 22kW-os villanymotor általi meghajtással. A műszaki dokumentációk szerint egy ilyen ciklofan maximális légszállítása $54000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, tehát a három ventilátor összesítetten $162000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ légszállítással rendelkezik. A két alsó hűtő ciklofan a vonatkozó technikai dokumentáció szerint CF 20-as 15 kW-os villanymotorral van szerelve, itt a légszállítás darabonként $23000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Vagyis a kettőnél $46000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. A keverési arány teljesen nyitott állapotban 78-22%. Ez az arányszám fontos lesz a későbbiekben a Mollier h-x diagram szerkesztésénél és az ezzel a módszerrel történő fajlagos számításoknál. A termény hőmérsékletét PT 100-as hőérzékelők mérik.



2. ábra: Cimbria AEG-18R szemestermény-szárító

(Forrás: saját készítésű fénykép)

2.2. A mérés célja és módszere

A dolgozatomban bemutatott mérési módszer célja az, hogy meghatározzam a berendezés felületi hőmérsékletét az adott környezeti és berendezésben beállított paraméterek mellett, valamint az energetikai ellenőrző vizsgálat kimenetképpen kapott földgáz alapú hőfelhasználás és fajlagos hőfelhasználás értékekkel összevetsem a kapott veszteséget.

Ezzel három dolgot szeretném megvizsgálni:

- azt az állítást, hogy a sugárzással leadott hőmennyiség nagyságrendileg a berendezés teljes hővesztesége,
- megtudni azt, hogy mennyire használható a termográfia a felületi hő mérésére szemestermény-szárítók esetében,
- megkapni a szárító felületi hőmérsékletét, majd a kapott értéket a felhasznált földgáz százalékában vizsgálni, hogy mekkora veszteséget jelent ez, illetve összevetni a kapott adatot a számított fajlagos energiafogyasztási adatokkal.

A mérési metódus a következő lépésekből épül fel:

- 1) A Cimbria szárító hőenergetikai ellenőrzése a telephelyen, majd földgáz- illetve Mollier h-x adatok alapján kalkulálni a fajlagos hőenergia felhasználást,
- 2) A kiválasztott berendezés méréséhez optimális környezeti feltételeket biztosító hőkamerás mérési időpont kiválasztása (az 1.6.2. fejezetben meghatározott feltételek teljesülésével),
- 3) A felület egy kiválasztott paneljén mérési pontok meghatározása, majd kontakt hőmérővel végzett mérések elvégzése,
- 4) A kontakt hőmérő értékeinek segítségével a berendezés emissziós tényezőjének beállítása a kamerában,
- 5) A berendezésről hőkamerás felvételek elkészítése a megfelelő szögekben és távolságokból, illetve speciális „IR” – elemezhető – képkiterjesztésű képek mentése,
- 6) A hőkamerás felvételek szoftveres elemzése, illetve oldalankénti átlag hőmérsékletek meghatározása a felület tekintetében,
- 7) A berendezés adott felület méreteinek pontos meghatározása Solid Edge szoftver segítségével (dwg rajzokból),
- 8) A kapott adatok segítségével a leadott hőáramsűrűség (q), a hőmennyiség (Q) meghatározása, valamint az elvesztett hőmennyiség kalkulációja a felhasznált földgáz-energia százalékában.

2.3. Az alkalmazott mérőműszerek és elemző szoftverek

2.3.1. Testoterm 4510 mérőműszer

A Testoterm 4510 egy olyan multifunkciós mérőeszköz, amely képes légsebesség, hőmérséklet és relatív páratartalom mérésére. A Testo cég alapvetően épületgépészeti, légtechnikai, szellőzéstechnikai mérések elvégzésére fejlesztette ki. Maga a készülék és tartozékai egy bőröndben vannak elhelyezve, mely a 3. ábrán látható.

Méréseimhez alapvetően ezen készülék hőmérsékletmérő antennáját használtam, de végeztem méréseket relatív páratartalom vonatkozásban a páratartalom detektorral is.

A hőmérsékletmérő antenna tulajdonképpen egy NiCr-NiAl detektor. Ezen szondán kívül csatlakoztatható még a Testoterm mérőeszközhöz merülő-, vagy áthatoló szonda. A készülék

DIN szabványszerinti 8 tűs csatlakozót képes fogadni. A felületmérő mérési tartománya -200 °C-tól +500 °C közötti. (Testoterm kezelési utasítás.)



3. ábra: Testoterm 4510 mérőműszer

(Forrás: saját készítésű fénykép)

2.3.2. Fluke Ti25 ipari hőkamera

A sugárzó felületek méréséhez egy Fluke Ti25, 2008-as gyártási évjáratú ipari hőkamerát használtam (4. ábra). A Fluke Ti25 mérőeszköz 640 x 480 mm méretű LCD képernyőjén megjelenő hőkép és fénykép egy SD kártyára menthető le. Az eszköz csomagja a számítógépes mentéshez szintén tartalmaz egy kártyaolvasót, mely USB kábel segítségével csatlakoztatható a számítógéphez és ilyen módon menthetővé válnak a vizsgálat során készített felvételek. A kamera képes egyetlen képként megjeleníteni a hőképet és a fényképet, az úgynevezett „kép a képben” PIP technológiai segítségével. A műszer mérési pontossága $\pm 2\text{ °C}$ vagy 2%, amelyik a két érték közül a nagyobb. A készüléken század pontossággal állítható az emissziós tényező, illetve geometriai – IFOV – pontossága 2,5 mrad. (Fluke Ti25 kezelési utasítás)



4. ábra: Fluke Ti25 ipari hőkamera
(Forrás: saját készítésű fénykép)

2.3.3. Smartview Classic hőkép elemző szoftver

A szoftver a Fluke saját elemző és jelentéskészítő szoftvere. Legfrissebb verziója elsősorban az RSE kameramodellekhez készült, és átfogó eszközkészletet kínál a pontos és részletes elemzés elkészítéséhez, valamint a professzionális jelentések prezentálásához.

Főbb jellemzői közül kiemelhető felhasználóbarát használhatósága, az elemző eszközkészlet széles választéka, a trendelemzések, hisztogramok és egyéb statisztikai megoldások, valamint képszűrők megléte. Ami viszont különlegessége, hogy az RTC érték és akár az emissziós érték a képek elemzésekor utólagosan is korrigálható, mely korrekcióval módosulnak az elemzés hőértékei is. (INTERNET 4)

2.3.4. Air Humid Handling (AHH) szoftver

A szoftver a Zeller Consulting Suisse saját fejlesztésű terméke, amely HVAC – Heating, ventilation and air conditioning - technológiákkal foglalkozó szakemberek számára készült. A Mollier h-x diagram készítő szoftverek mellett elérhetőek hőcserélő, hővisszanyerő és egyéb termodinamikai szoftverek is a cég kínálatában. (Internet 6)

3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS AZOK KIÉRTÉKELÉSE

3.1. Energetikai ellenőrző műszaki felülvizsgálat

A vizsgálat bemeneti értékeit a Testoterm 4510 műszer segítségével határoztam meg. Így mértem a környezeti feltételeket (hőmérséklet, relatív páratartalom), a ventilátorok által továbbított közeg hőmérsékletét és relatív páratartalmát. A bemenő és a szárított kukorica nedvességtartalmát a gépkezelőktől kaptam meg, melyet szabványos műszerrel mértek (Mininfra-2000T típus) (2. táblázat).

A szárítólevegő hőmérsékletét a Cimbria PT100-as hőmérője biztosította, valamint a gázmérő adatait a szabványos szolgáltatói gázfogadó digitális mérőórájáról olvastam le.

2. táblázat: Cimbria szárítón mért levegő paraméterek

Mérés ideje: 2023.10.20. Ideje: 09:40-11:40 (2h)				
Sorszám	Mérési pont	Hőmérséklet °C	Relatív páratartalom φ (%)	W %
1	Környezeti hőmérséklet (égőtérbe beszívott)	14,5	85,1	
2	Szárítózónába belépő	92	4 (becsült)	
3	Felső szárítózónából kilépő	24	99,9	
4	Középső szárítózónából kilépő	42,1	99,9	
5	Alsó szárítózónából kilépő	44,2	99,9	
6	Felső visszaforgatott (hűtőzónából)	47,3	23,4	
7	Alsó visszaforgatott (hűtőzónából)	38,1	31	
8	Szárítandó kukorica nedvességtartalma			19,5
9	Szárított kukorica nedvességtartalma			13,1

(Forrás: saját készítésű táblázat)

3.1.1. Cimbria gázfogyasztás alapú fajlagos hőfelhasználásának meghatározása

A szárított anyag nedvességének és tömegáramának ismeretében a szárítókamra vízpárologtató teljesítménye (24):

$$G_v = G_2 \times \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1} = 15700 \times \frac{19,5 - 13,1}{100 - 19,5} = 1248,1 \text{ kg/h} \quad (24)$$

ahol:

G_v - a szárító vízpárologtató képesség (kg/h),

G_2 - a szárított anyag mennyisége óránként (15700kg/h – a gépkezelőtől kapott adat),

W_1 – a nedves anyag víztartalma (%),

W_2 – a szárított anyag víztartalma (%)

A földgáz felhasználásakor keletkezett összes vízmennyiség óránként (25):

$$m_{\text{v}\acute{\text{z}}} = V_{\text{g}} \times m_{\text{v}\acute{\text{z}}\text{ch4}} = 134,7 \times 1,607 = 216,5 \text{ kg/h} \quad (25)$$

ahol:

$m_{\text{v}\acute{\text{z}}\text{ch4}}$: 1,607 kg/Nm³ földgáz eltüzelésekor keletkező vízmennyiség (Antal-Szászi, 2022)

$m_{\text{v}\acute{\text{z}}}$: összes vízmennyiség óránként (kg/h)

V_{g} : gázfogyasztás (134,7 Nm³/h – leolvasott adat)

A földgáz eltüzelésekor keletkezett víz mennyiségéhez ($m_{\text{v}\acute{\text{z}}}$) hozzáadjuk a szárító vízpárologtató képességét (G_v) (26):

$$G_{\text{v}'} = G_v + m_{\text{v}\acute{\text{z}}} = 1248,1 + 216,5 = 1464,7 \text{ kg/h} \quad (26)$$

ahol:

$G_{\text{v}'}$: valós vízpárologtató teljesítmény (kg/h)

G_v : a szárító vízpárologtató képessége (kg/h)

$m_{\text{v}\acute{\text{z}}}$: összes vízmennyiség óránként (kg/h)

Az óránként felhasznált hőenergia (Q_k) (27):

$$Q_k = V_{\text{g}} \times H_{\text{g}} = 134,7 \times 34 = 4579,8 \text{ MJ/h} \quad (27)$$

ahol:

Q_k : óránként felhasznált hőenergia (MJ/h)

V_{g} : gázfogyasztás (Nm³/h)

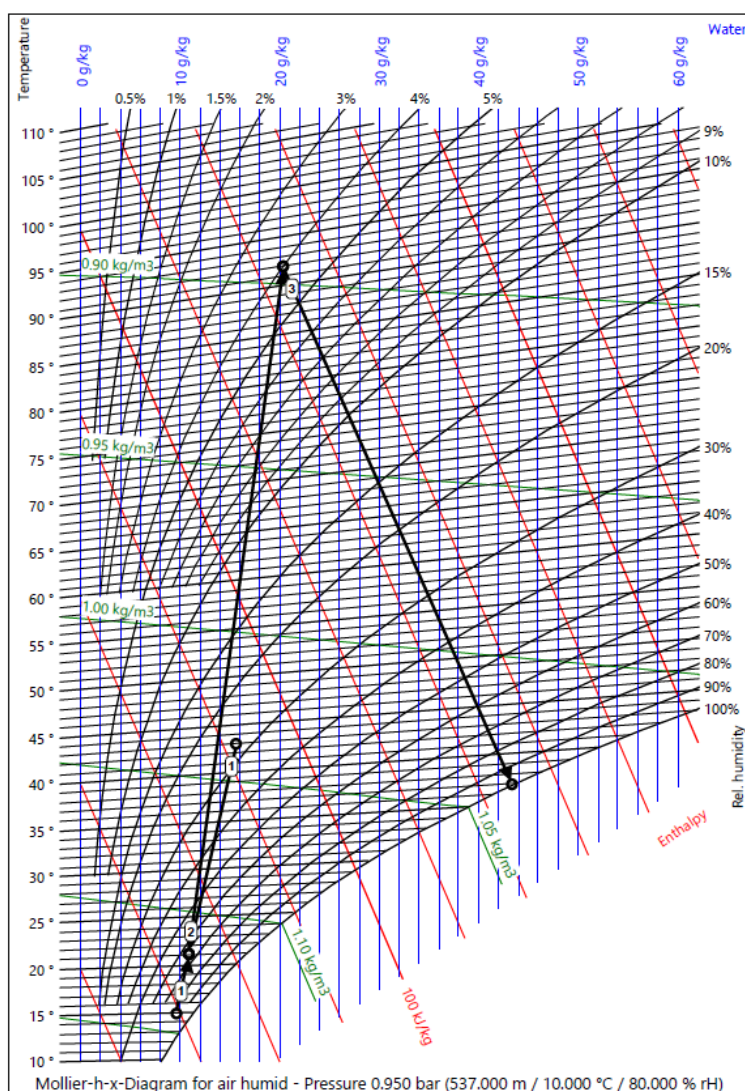
H_{g} : földgáz fűtőértéke (34 MJ/m³ – gázszolgáltatótól kapott adat)

Innen a Cimbria szárító fajlagos hőfelhasználása (q_f) a gázfogyasztás alapján számolva (28):

$$q_f = \frac{Q_k}{G_{vf}} = \frac{4579,8}{1464,7} = 3,126 \frac{MJ}{kg_{v\acute{e}z}} \quad (28)$$

3.1.2. Cimbria fajlagos hőfelhasználása Mollier-féle h-x diagram adatai alapján

Az 5. ábrán látható a ventilátorok által közölt hőmennyiség Mollier h-x diagramban ábrázolva, ahol a ventilátorok légtechnikai adatai átlagolva vannak, illetve 78-22%-ban van megadva a keverési arány (1-1') a ventilátorok ismert légszállításai szerint.



5. ábra: Ventilátorok által szállított közeg állapotváltozása Mollier-féle h-x diagram alapján

(Forrás: saját készítés)

Az 1kg száraz levegővel elvihető nedvesség meghatározható az alábbi összefüggéssel (29):

$$\Delta x = (x_4 - x_2) \quad (29)$$

ahol:

Δx : 1 kg száraz levegővel elvihető nedvesség mennyisége (kg/kg)

$x_4; x_2$: a h-x diagramból leolvasott értékek (1. melléklet)

A 5. ábra diagramjából kapott értékek:

$$x_4 = 43,3422 \frac{g}{kg} \quad x_2 = 10,9372 \frac{g}{kg}$$

Innen Δx (30):

$$\Delta x = x_4 - x_2 = 43,3422 - 10,9872 = 32,355 \frac{g}{kg} = 0,03255 \frac{kg}{kg} \quad (30)$$

A következőkben egy egyszerűsített számítással adom meg a fajlagos q_f értékét, előtte azonban levezetem, hogy miért használható ez a formula.

Meghatározható a szárításhoz 1 óra alatt szükséges levegő tömege (31):

$$L = \frac{G_v}{\Delta x} \quad (\text{kg/h}) \quad (31)$$

ahol:

L : a szárításhoz szükséges levegő tömege (kg/h)

G_v : a szárító vízpárologtató képessége (kg/h)

Δx : 1 kg száraz levegővel elvihető nedvesség mennyisége (kg/kg)

Innen G_v (32):

$$G_v = L \Delta x \quad (\text{kg/h}) \quad (32)$$

A levegővel közölt hő értékét az alábbi összefüggés adja meg (33):

$$q_k = h_3 - h_2 \frac{kJ}{kg} \quad (33)$$

ahol:

q_k : 1 kg nedves levegővel közölt hőmennyiség (kJ/kg)

$h_3; h_2$: a Mollier h-x diagramról leolvasott érték (1. melléklet)

A teljes hőigény pedig a fentiek után az alábbi összefüggéssel számolható (34):

$$Q_k = L \times q_k \left(\frac{MJ}{kg} \right) \quad (34)$$

ahol:

Q_k : a teljes hőigény (MJ/h)

L : a szárításhoz szükséges levegő tömege (kg/h)

q_k : 1 kg nedves levegővel közölt hőmennyiség (kJ/kg)

A fajlagos hőfelhasználást pedig az alábbi összefüggés adja meg a fenti egyenletek felhasználását követően (35):

$$q_f = \frac{Q_k}{G_v} \left(\frac{MJ}{kg_{v\acute{e}z}} \right) \quad (35)$$

Ha azonban a fenti egyenleteket jobban szemügyre vesszük, akkor tudunk élni némi átalakítással (36):

$$q_f = \frac{Q_k}{G_v} = \frac{L \times q_k}{L \times \Delta x} = \frac{L \times (h_3 - h_2)}{L \times (x_4 - x_2)} \quad (36)$$

Majd „L”-el egyszerűsítve az alábbi összefüggést kapjuk, ami megadja a fajlagos hőfelhasználást (37):

$$q_f = \frac{h_3 - h_2}{x_4 - x_2} \left(\frac{MJ}{kg_{v\acute{e}z}} \right) \quad (37)$$

Az entalpia értékek különbsége fogja megadni az 1kg nedves levegővel közölt hőmennyiséget. Ezeket az értékeket is az 5. ábráról kapjuk meg:

$$h_3 = 148,586 \frac{kJ}{kg} \quad h_2 = 49,1276 \frac{kJ}{kg}$$

$$q_k = h_3 - h_2 = 148,586 - 49,1276 = 99,46 \frac{kJ}{kg} \quad (38)$$

A fajlagos hőfelhasználás Mollier h-x diagram adatai alapján tehát (39):

$$q_f = \frac{h_3 - h_2}{x_4 - x_2} = \frac{99,46}{0,03255} = 3057 \frac{kJ}{kg_{v\acute{e}z}} = 3,06 \frac{MJ}{kg_{v\acute{e}z}} \quad (39)$$

3.2. Helyszíni hőkamerás mérés és eszközkalibrálás

Ahogy arra szakirodalmi elemzésem során is kitértem, az egyik legfontosabb lépés a termográfiai mérések időpontjának helyes kiválasztása. Ezért a megfelelő időjárási körülmények és környezeti feltételek megválasztása kulcsfontosságú volt a mérés előtt. A mérés napját megelőzően egy nappal egy könnyű esős napon voltunk túl, a mérés napja is még felhős volt, de már nem volt eső. A helyszíni vizsgálat idejének egy olyan időpontot választottam, amikor a nap már lement – ezzel a nap besugárzó hatása is megszűnt – valamint mind a hőmérséklet, mind pedig a páratartalom megfelelő volt. Adott napon, a mérés időpontjában a környezeti hőmérséklet 15,9 °C, a relatív páratartalom 78% volt (3. táblázat).

3. táblázat: A termográfiai vizsgálat főbb adatainak összegzése

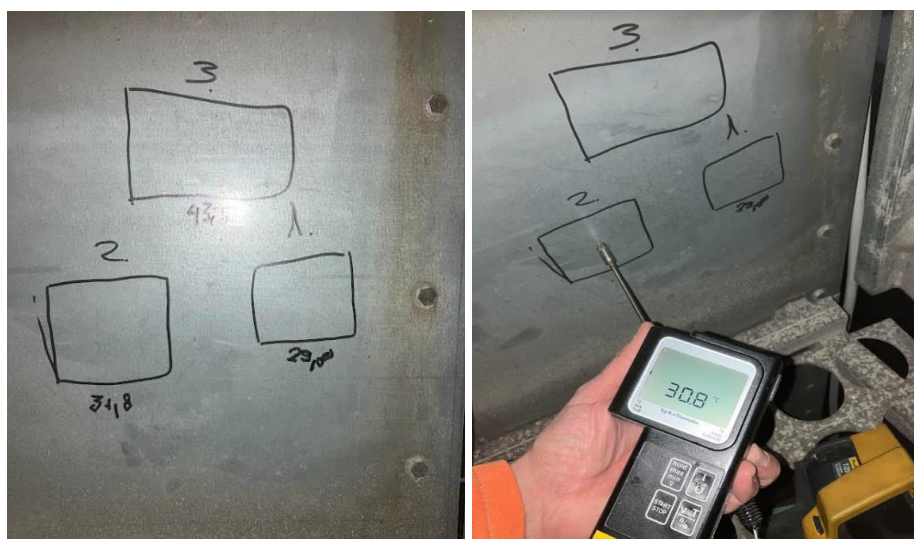
Mérés ideje: 2023.10.25. Ideje: 18:00-20:00 (2h)				
Sorszám	Adatok	Hőmérséklet °C	Relatív páratartalom φ (%)	W %
1	Környezeti hőmérséklet (égőtérbe beszívott)	15,9	78	x
2	Szárító levegő hőmérséklete (PT100-ról)	93	4	x
3	Szárítandó kukorica nedvességtartalma	x	x	19
4	Szárított kukorica nedvességtartalma	x	x	13,5

(Forrás: saját készítésű táblázat)

A szárítás folyamatosan zajlott a Cimbria szárítón, ahol a bemenő kukorica nedvességtartalma 19%, a szárítólevegő hőmérséklete – a PT100-as meleg oldali hőmérséklet mérő adatai szerint – pontosan 93 °C volt.

A mérés első lépésében jelen dolgozat 1.6.3. fejezetében leírt kontakt hőmérős módszerrel kalibráltam a Fluke Ti25 hőkamerát. Először három, egymástól független, de egy szerkezeti panelen lévő mérési területet vettem fel, melyen a Testoterm 4510 műszer felületmérő detektorával megmértem a felület hőmérsékletét (6. ábra). Majd a kapott értékeket feljegyeztem a kijelölt mérési terület alá filctollal a burkolatra, oly módon, hogy a felülethőmérő legnagyobb mért értékét vettem bázisnak. A területek berajzolása azért volt fontos, mert az ily módon a jelölt terület a festékanyag okán eltér a hőképen, ezért könnyen azonosítható a kameraképen is. Így pontosan meg tudtam találni a kamerával is a kijelölt területet a kalibráció során. Az így elvégzett hőkamera kalibráció 0,41-es emissziós értéket hozott.

Ez az érték több okból is felkeltette érdeklődésemet, ugyanis a Helsinki Egyetem kollégái által készített tanulmányban (INTERNET 1) nem mérték ugyan a horganyzott acél felület emissziós értéket, de vonatkozó táblázatok által megadott 0,26-os értéket 0,4-re korrigálták, azzal a magyarázattal, hogy a felület több, mint 20 éves, minek okán az bevonatolás előregedése indokoltta a pozitív eltérést az emissziós tényező tekintetében.



6. ábra: Mintavételi területek és a felület mérése

(Forrás: saját készítésű képernyőfotó)

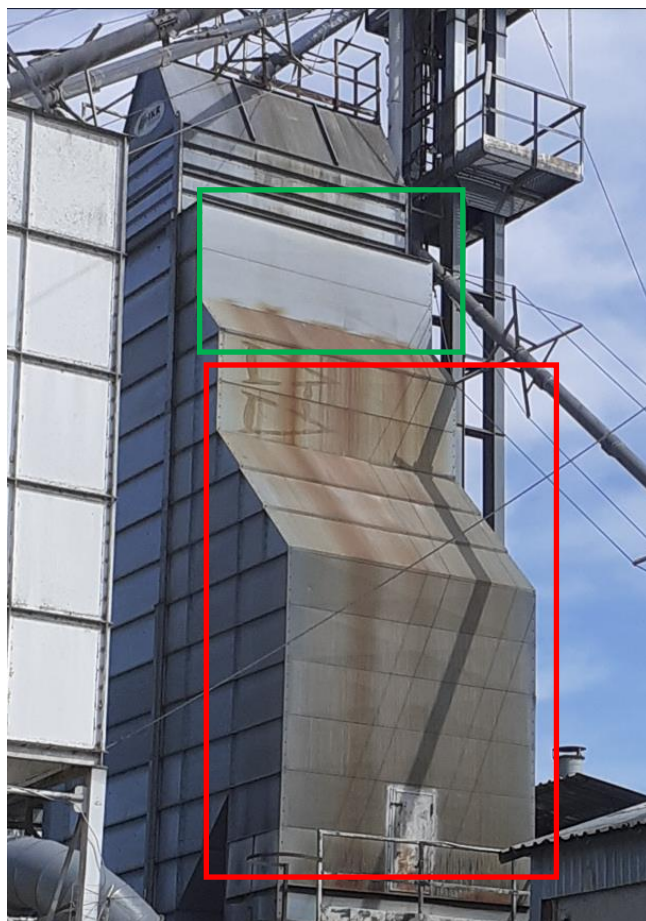
A hőképeket a fenti kalibrálás nyomán 0,4-es emissziós tényezőre (ϵ) beállított hőkamerával készítettem el.

3.3. Hőképek és elemzésük

A hőképek helyszíni elkészülésekor már sötét volt, azonban tudtam, hogy felület erősen inhomogén (7. ábra). Tehát a fent kalibrált 0,4-es emissziós tényező értéke csak a szárító egy kis részén fogja jól visszaadni a hőmérsékleti értékeket.

Ezt az inhomogenitást véleményem szerint két dolog okozza:

- a szárító horganyzott acéllemez paneljai – különösen a meleg oldal hátfalán – a nagy hőterhelés – és az eltelt évek okán – már erősen korrodáltak,
- a bővítések és egyéb múltbéli javítások során cseréltek paneleket, melyek lényegesen jobb állapotban voltak.



7. ábra: Mintavételi területek és a felület mérése
(Forrás: saját készítésű képernyőfotó)

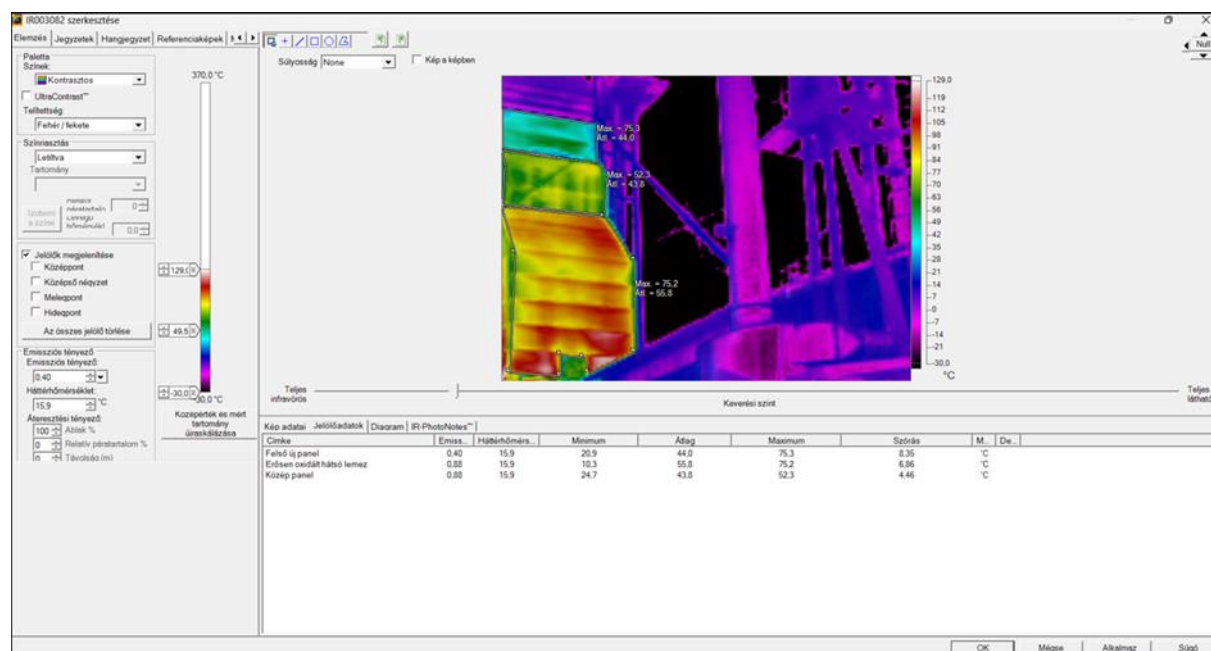
Jól látható a fenti ábrán (7. ábra), hogy mekkora terület az, amely erősen korrodált, illetve az is, hogy ezen az adott felületen belül is megfigyelhetőek sávok felületkülönbségei. Zöld kerettel

jelöltem az ábrán a relatív új szerkezeti elemeket, illetve pirossal az elhasználódott, régieket. Éppen ezek miatt a Smartview szoftver segítségével korrigálnom kellett az elemzés során felületenként az emissziós tényező értékét, amely a szoftverben $\varepsilon=0,88$ értéket jelentett oxidált acéllemez esetében.

A szoftveres elemzés során az RTC értéket a külső hőmérséklet beállításával lehet hangolni, melyet $15,9^{\circ}\text{C}$ -ra állítottam. A hideg diffúz sugárzást – tehát az égi sugárzást lásd jelen dolgozat 1.6.2. fejezete – az IR képek elemzése során külön színnel elválasztottam szoftveresen, így ki lehetett zárni a szerkesztés során azt, hogy bevonjam a kalkulációba, ezzel torzítva a számított felületi átlag hő értékét.

3.3.1. Hátfal elemzése

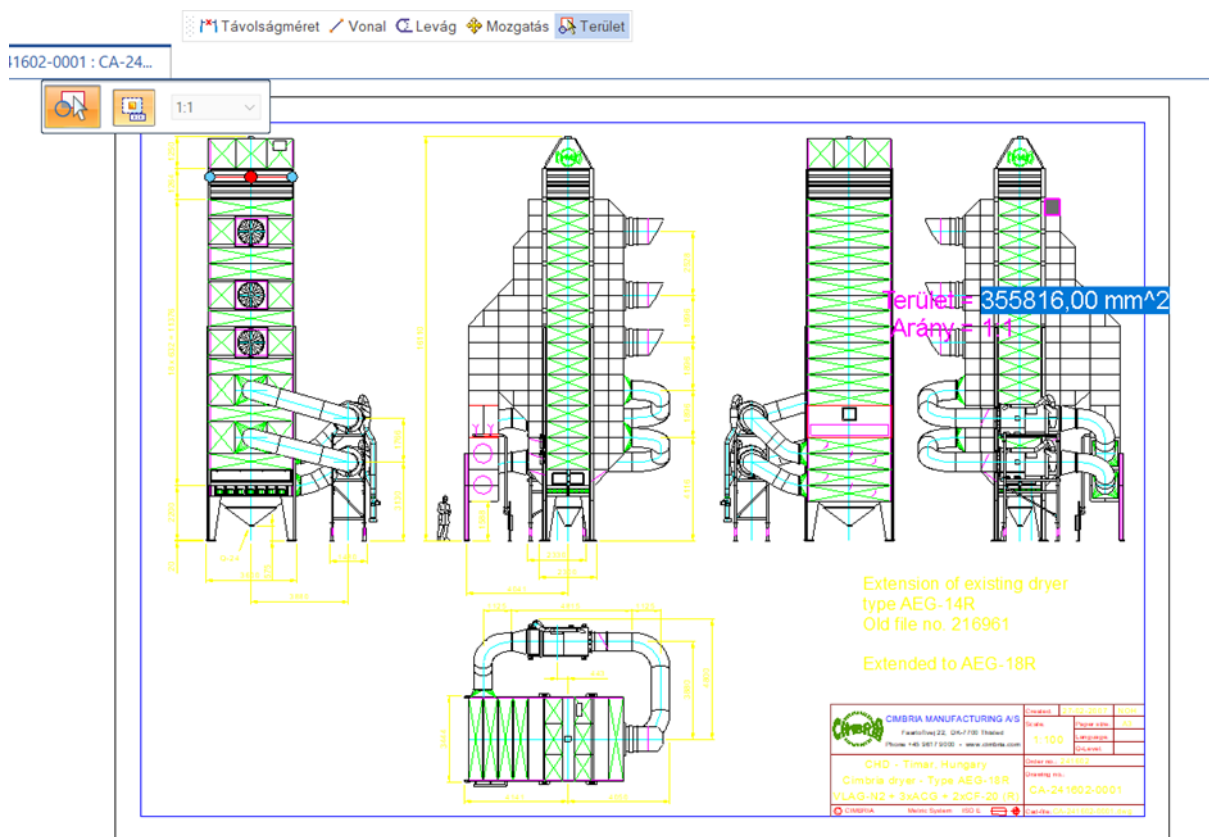
A Smartview szoftverben (8. ábra) a fenti alapbeállítások mellett három részre bontottam a meleg oldal hátfalát, amelyekre külön adtam meg az emissziós tényezőket. A felbontást a szoftver saját jelölő alkalmazásával végeztem el, mellyel lehetőség van megadni a mérni kívánt terület kontúrját, így más értéket nem számol bele az átlaghőmérséklet kalkulációba.



8. ábra: Hátsó fal Smartview elemzése és felosztása
(Forrás: saját készítésű képernyőkép)

Majd a további számítások elvégzéséhez szükséges területszámításokat Solid Edge szoftverben végeztem el a CHH Műszaki kft – a Cimbria hazai hivatalos képviselője – által részemre

biztosított dwg. rajzok felhasználásával (9. ábra). Kijelöltem a szükséges szerkezeti panel elemeket vagy elem sorokat, melyekre területszámítást eszközöltem. Az így kapott adatokkal számoltam tovább az Excel programban.

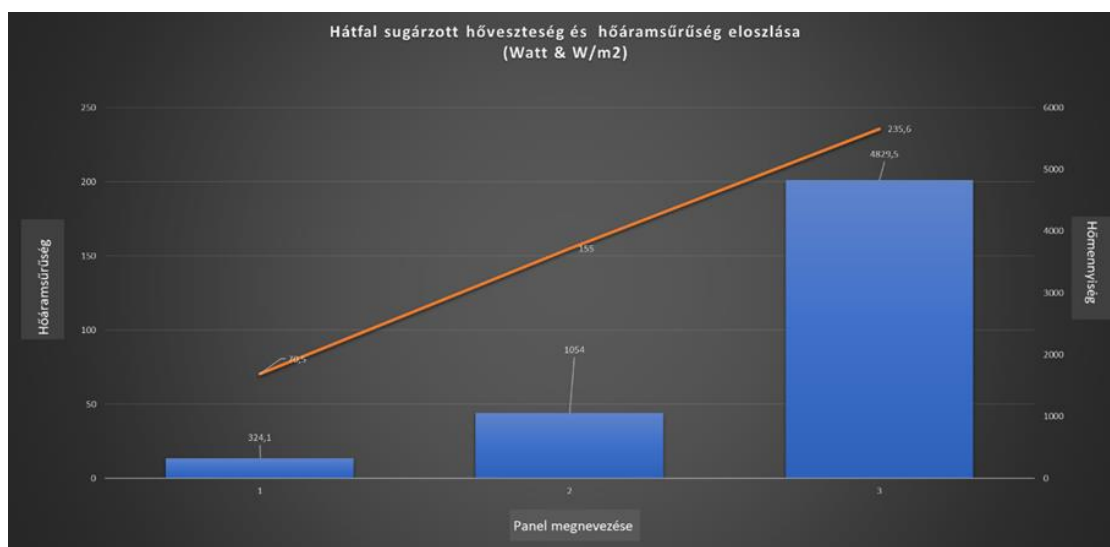


1. Felső két új panel sugárzott hővesztése			2. Középső hátfali oxidált		
Külső hőmérséklet	288,9	Kelvin	Külső hőmérséklet	288,9	Kelvin
Átlag falhőmérséklet	316,80	Kelvin	Átlag falhőmérséklet	316,80	Kelvin
Fal területe	4,6	m ²	Fal területe	6,8	m ²
Emissziós tényező	0,4		Emissziós tényező	0,88	
Stefan-Boltzman állandó	5,7E-08		Stefan-Boltzman állandó	5,7E-08	
Átlag falhőmérséklet negyedik hatványa	1E+10	Kelvin	Átlag falhőmérséklet negyedik hatványa	1E+10	Kelvin
Külső hőmérséklet negyedik hatványa	7E+09	Kelvin	Külső hőmérséklet negyedik hatványa	7E+09	Kelvin
A fal hőáramsűrűsége	70,5	W/m ²	A fal hőáramsűrűsége	155,0	W/m ²
A fal hővesztése (Q _{fal})	324,1	Watt	A fal hővesztése (Q _{fal})	1054,0	Watt

3. Nagy sík felület oxidált		
Külső hőmérséklet	288,9	Kelvin
Átlag falhőmérséklet	328,80	Kelvin
Fal területe	20,5	m ²
Emissziós tényező	0,88	
Stefan-Boltzman állandó	5,7E-08	
Átlag falhőmérséklet negyedik hatványa	1,2E+10	Kelvin
Külső hőmérséklet negyedik hatványa	7E+09	Kelvin
A fal hőáramsűrűsége	235,6	W/m ²
A fal hővesztése (Q _{fal})	4829,5	Watt

10. ábra: A hátfali hőszugárzás általi hővesztesség elemzésének eredménye
(Forrás: saját készítésű táblázatok)

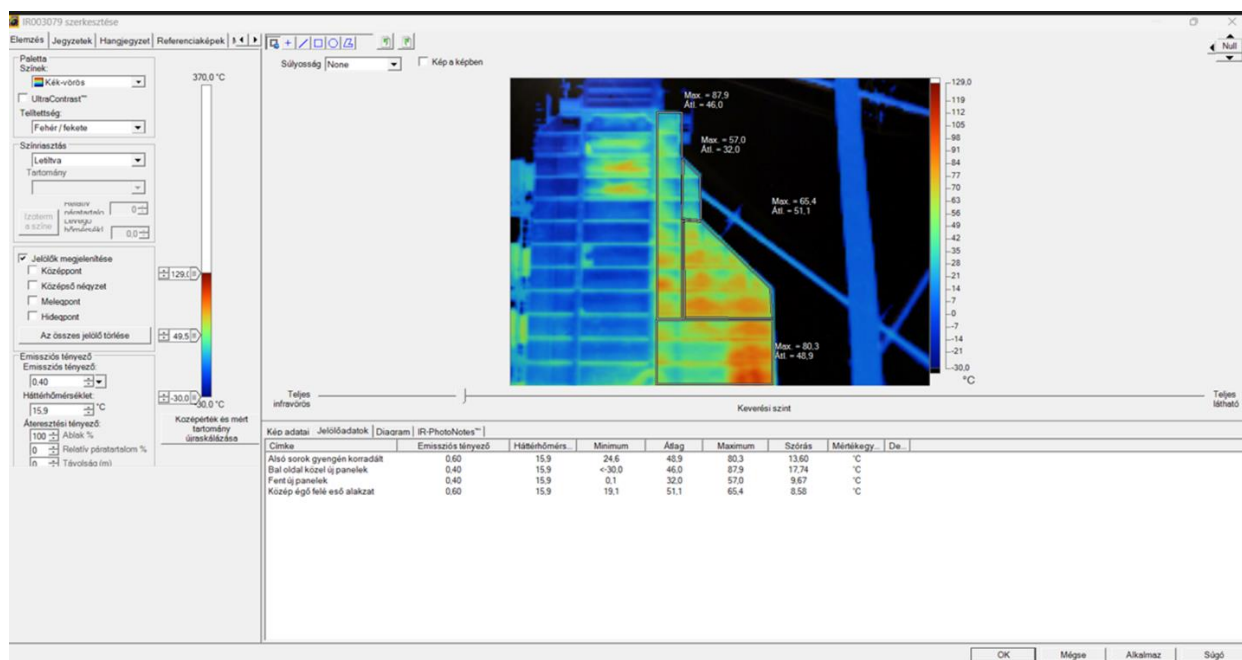
Ha az oszlopdiagramban ábrázoljuk a mért területek vonatkozásában a hővesztesség eloszlását (11. ábra), akkor azt találjuk, hogy a hátfal esetében az erősen oxidált sík felület veszti a legtöbb hőt. Nyilván ez egyrészt adódik abból is, hogy méretét tekintve is ez a legnagyobb terület, azonban ezen mért területnek a legnagyobb az átlaghőmérséklete is, ami 55,8 °C, ami a gázégő közelségének és így a legnagyobb láng sugárzó hőjének való kitettséget is jelenti. Ugyanezen ábra vonaldiagramja ábrázolja az adott terület hőáramsűrűségét, ami jól mutatja, hogy mennyivel nagyobb ez az érték ott, ahol a gázégő közelsége releváns. A nagy hátfali részen (3-as számú oszlop), ez 235,6 W/m²-re adódott.



11. ábra: A hátfal által sugárzott hővesztességének eloszlása
(Forrás: saját készítésű diagram)

3.3.2. Oldalfalak elemzése

Az meleg oldali oldalfalak esetében négy részre bontottam az adott felületet (12. ábra). Ennek oka szintén a felület paneljainak inhomogenitása volt (7. ábra).



12. ábra: Az oldalfalak hőszugárzás általi hővesztés elemzésének eredménye

(Forrás: saját készítésű képernyőkép)

Az érintett panelek állapota azonban lényegesen jobb volt az oldalfalak esetében, mint a hátfalnál, ezért a nem újszerű panelek vonatkozásában az emissziós tényező értékét 0,88 helyett 0,6-ra állítottam a szoftverben, amely a hengerelt acéllemez emissziós tényezőjének felel meg. Azért ezt az értéket választottam, mert az 7. ábrán megfigyelhető inhomogenitás és korrodáltság jelen van ugyan az oldalfalak esetében is, azonban nem olyan mértékben, mint a hátfal esetében. Az újabb panelek esetében 0,4 volt a beállított ϵ értéke. A terület meghatározást szintén Solid Edge szoftver segítségével végeztem el.

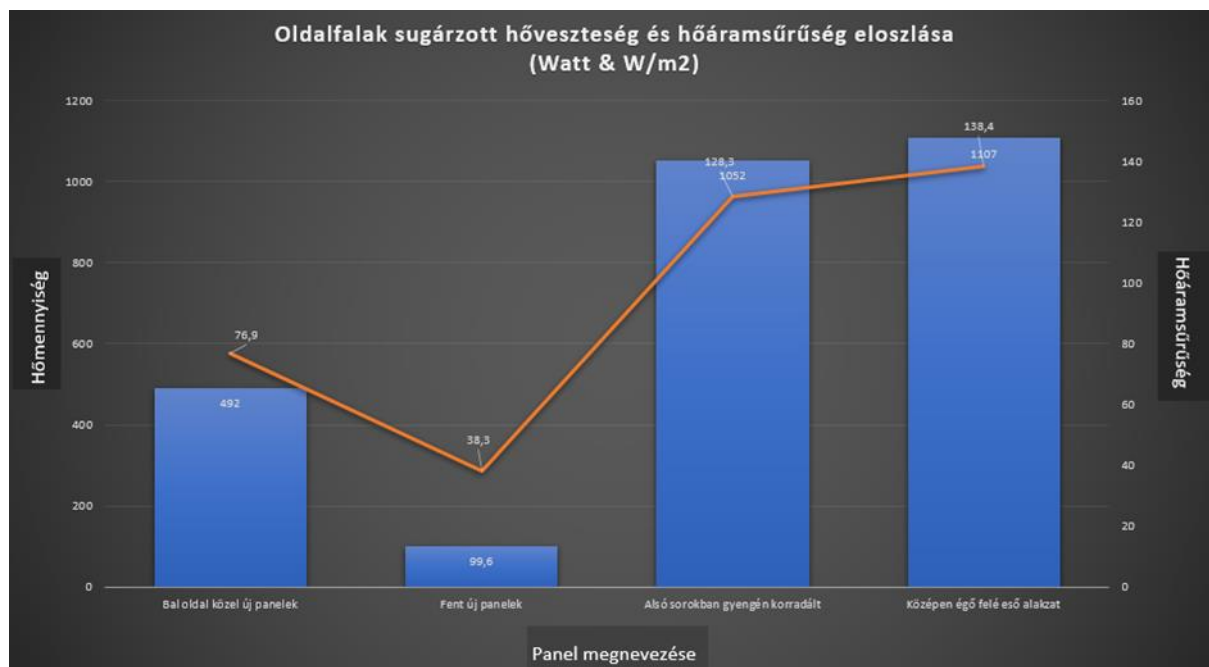
Az eredményeket a 13. ábrában összegeztem. Megfigyelhető, hogy mennyivel kisebb sugárzás általi hővesztés mértéke, mint a hátfal esetében. A 14. ábrán látható, hogy a hőáramsűrűség legnagyobb értéke az oldalfal esetében $138,4 \text{ W/m}^2$, amely a hátfal legnagyobb értékéhez képest – $235,6 \text{ W/m}^2$, lényegesen kisebb. A vizsgálat során azonban csak a 12. ábrán látható oldalfalat tudtam úgy mérni az hőkamera segítségével, hogy az teljes egészében értékelhető legyen. Az átellenes oldalfal elemei mellé épült ugyanis az előtisztító platformja, amely kitakarta ezt a falat a kamera elől. Azonban a két oldalfal állapota szinte teljesen megegyező volt, ezért a felmért

oldalfal értékeivel azonosnak vettem a másik fal értékeit is, ennek okán a 14. ábrán már duplikáltam számított hőmennyiség értékeket és ezeket jelenítettem meg az oszlopdiagramban.

1. Bal oldali közel új panelek (2x)			2. Fent új panelek (2x)		
Külső hőmérséklet Kelvin	288,9	Kelvin	Külső hőmérséklet Kelvin	288,9	Kelvin
Átlag falhőmérséklet Kelvin	319,00	Kelvin	Átlag falhőmérséklet Kelvin	305,00	Kelvin
Fal területe	3,2	m ²	Fal területe	1,3	m ²
Emissziós tényező	0,4		Emissziós tényező	0,4	
Stefan-Boltzman állandó	5,7E-08		Stefan-Boltzman állandó	5,67E-08	
Átlag falhőmérséklet negyedik hatványa	1E+10	Kelvin	Átlag falhőmérséklet negyedik hatványa	8,65E+09	Kelvin
Külső hőmérséklet negyedik hatványa	7E+09	Kelvin	Külső hőmérséklet negyedik hatványa	6,97E+09	Kelvin
A fal hőáramsűrűsége	76,9	W/m ²	A fal hőáramsűrűsége	38,3	W/m ²
A fal hővesztése (Q _{fal})	492	Watt	A fal hővesztése (Q _{fal})	99,5	Watt

3. Alsó sorok gyengén korradált (2x)			4. Középen égő feletti alakzat (2x)		
Külső hőmérséklet Kelvin	288,9	Kelvin	Külső hőmérséklet Kelvin	288,9	Kelvin
Átlag falhőmérséklet Kelvin	321,90	Kelvin	Átlag falhőmérséklet Kelvin	324,10	Kelvin
Fal területe	4,1	m ²	Fal területe	4	m ²
Emissziós tényező	0,6		Emissziós tényező	0,6	
Stefan-Boltzman állandó	5,7E-08		Stefan-Boltzman állandó	5,7E-08	
Átlag falhőmérséklet negyedik hatványa	1,1E+10	Kelvin	Átlag falhőmérséklet negyedik hatványa	1,1E+10	Kelvin
Külső hőmérséklet negyedik hatványa	7E+09	Kelvin	Külső hőmérséklet negyedik hatványa	7E+09	Kelvin
A fal hőáramsűrűsége	128,3	W/m ²	A fal hőáramsűrűsége	138,4	W/m ²
A fal hővesztése (Q _{fal})	1052	Watt	A fal hővesztése (Q _{fal})	1107,0	Watt

13. ábra: Az oldalfalak hőszugárzás általi hővesztés elemzésének eredménye
(Forrás: saját készítésű táblázatok)



14. ábra: Az oldalfalak hőszugárzás általi hővesztésének eloszlása
(Forrás: saját készítésű diagram)

3.4. Teljes hőveszteség esztimációja

A fenti fal oldali sugárzás általi hőveszteség mérése hozott egy eredményt a keresett radiáció tekintetében, azonban el kell fogadnunk, hogy önmagában hősugárzás általi hőveszteség ezen a relatív alacsony hőmérsékletkülönbségen nem fordulhat elő. Azonban itt meg kell állnunk egy pillanatra és újra megnéznünk az 1.3. fejezet 1. táblázatát. Itt azt figyelhetjük meg, hogy a hősugárzás relatív alacsony hőmérsékletkülönbség esetén nagyságrendileg csak a felét adja az összes hőveszteségnek, ahol a másik fele a konvektív hőtranszportból fakad. Ezen számított értékek mentén gondolkodva becsülhetővé válik jelen esetben is a teljes hőveszteség, amely az alábbi metodika szerint adja meg a teljes hőveszteség mértékét.

Először meg kell határoznunk, hogy a mért felületi hőmérséklet értékek alapján milyen ΔT érték adódik, úgy, hogy a környezeti hőmérséklet (T_k) adott. Ezt úgy tudjuk megtenni, hogy minden felmért falfelület elem hőmérsékletének súlyozott átlagát vesszük.

Hátfal esetében tehát a súlyozott átlag felületi hőmérséklet (40):

$$T_h = \frac{T_1 \times A_1 + T_2 \times A_2 + T_3 \times A_3}{A_1 + A_2 + A_3} = \frac{324,54 \times 4,6 + 316,8 \times 6,8 + 328,8 \times 20,5}{4,6 + 6,8 + 20,5} = 325,54 \text{ K} \sim 52,5 \text{ °C} \quad (40)$$

ahol:

T_h : A hátfal súlyozott átlag szerinti hőmérséklete (K)

T_{123} : Az adott felmért felületek Smartview – képpontonkénti – átlaghőmérséklete (K) [10. ábra]

A_{123} : Az adott felület területe (m^2) [10. ábra]

Oldalfalak esetében a súlyozott átlag szerinti felületi hőmérséklet (41):

$$T_o = \frac{T_1 \times A_1 + T_2 \times A_2 + T_3 \times A_3 + T_4 \times A_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = \frac{319 \times 6,4 + 305 \times 2,6 + 321,9 \times 8,2 + 324,1 \times 8}{6,4 + 2,6 + 8,2 + 8} = 320,1 \text{ K} \sim 47,1 \text{ °C} \quad (41)$$

ahol:

T_o : Az oldalfal súlyozott átlag szerinti hőmérséklete (K)

T_{1234} : Az adott felmért felületek Smartview -képpontonkénti- átlaghőmérséklete (K)) [13. ábra]

A_{1234} : Az adott felület területe (m^2) [13. ábra] - a felületek kétszeresével számoltam.

Most számítsuk ki a teljes felmért felület súlyozott átlaghőmérsékletét (42):

$$T_f = \frac{T_h \times A_h + T_o \times A_o}{A_h + A_o} = \frac{325,54 \times 31,9 + 320,1 \times 25,2}{31,9 + 25,2} = 323,15 \text{ K} \sim 50,2 \text{ °C} \quad (42)$$

ahol:

T_f : A teljes meleg oldali felület súlyozott átlag szerinti hőmérséklete (K)

T_h : Az adott felmért hátfal felületek Smartview – képpontonkénti – átlaghőmérséklete (K)

T_o : Az oldalfal súlyozott átlag szerinti hőmérséklete (K)

A_h : Az hátfal teljes területe (m²)

A_o : A két oldalfal teljes területe (m²)

Innen adódik a ΔT (43):

$$\Delta T = T_f - T_k = 50,2 - 15,9 = 34,3 \text{ °C} \quad (43)$$

ahol: T_k : a környezeti levegő hőmérséklete (°C)

Ezen a ponton pedig becsüljük meg nagyságrendileg a konvektív hőveszteség mértékét, melyhez használjuk fel a következő összefüggést (44):

$$Q = Q_{konv} + Q_{sug} \quad (44)$$

A hőáramsűrűség (q) viszont a Q hőmennyiség adott területre vetített egysége, tehát képlete az alábbi (45):

$$q = \frac{Q}{A} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (45)$$

Ha viszont ez így számítható, akkor adott felület ismeretében az alábbi egyenlőség is kimondható (46):

$$\frac{q_{konv}}{q_{sug}} = \frac{Q_{konv}}{Q_{sug}} \quad (46)$$

Számoljuk ki a Q_{sug} – sugárzott hőmennyiség – értékét, úgy hogy összegezzük a 10. és 13. ábrából már kalkulált elemek egyes hőveszteségeit (47):

$$Q_{sug} = \sum_{i=1}^7 Q_i = 8958 \text{ W} = 8,958 \text{ kW} \quad (47)$$

Innen pedig egy ismerős aránypárral folytassuk, ami 1.3. fejezet 1. táblázatában százalékosan meg is van adva adott hőmérsékletkülönbség esetén.

Ha a hőmérsékletkülönbség *Fáy* (2020) szerint $\Delta T = 33 \text{ }^\circ\text{C}$, – mely hasonló az eredményemhez –akkor az aránypár (48):

$$\frac{q_{konv}}{q_{sug}} = \frac{55\%}{45\%} \quad (48)$$

Esetünkben a ΔT a 43. egyenletből $34,3 \text{ }^\circ\text{C}$. A 48. egyenlet összefüggését alkalmazzuk aránypárban ahhoz, hogy nagyságrendileg megbecsüljük a Q_{konv} értékét. Mivel a 46. egyenletben meghatározottak is érvényesek, így írjuk fel a kapott összefüggést az alábbiak szerint (49):

$$\frac{Q_{konv}}{Q_{sug}} = \frac{55\%}{45\%} \rightarrow Q_{konv} = \frac{0,55 \times 8,958}{0,45} = 10,949 \text{ kW} \quad (49)$$

Tehát megkaptuk a becsült konvektív hőveszteség mértékét. Nincs más dolgunk, mint összegeznünk a sugárzott és konvektív hőveszteségeket, így megkapjuk a becsült teljes hőveszteséget (50):

$$Q_{sumv} = Q_{sug} + Q_{konv} = 8,958 + 10,949 = 19,907 \text{ kW} \quad (50)$$

Most váltsuk át a kapott Q_{sumv} összes hőveszteséget MJ mértékegységre (51):

$$Q_{sumv} = 19,907 \text{ kW} \times 3,6 = 71,67 \text{ MJ/h} \quad (51)$$

Végül pedig számoljuk ki, hogy a kapott veszteség hogyan aránylik a bevitt energiához (27 számú képlettel számolva) százalékosan (52):

$$Q_{vesz\%} = \frac{Q_{sumv}}{Q_k} \times 100 = \frac{71,67}{4579,8} \times 100 = 1,56\% \quad (52)$$

A Q_{sumv} értelmezhető a szakirodalomból ismertebb Q_h veszteségként is. (Beke, 1997)

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A-hőtechnikai ellenőrző műszaki felülvizsgálat eltérő fajlagos hőfelhasználás értéket hozott a földgáz alapú számításnál, illetve a Mollier féle h-x diagram alapján készült kalkulációban. Földgáz alapon a számítás $3,126 \frac{MJ}{kg_{v\acute{z}}}$, míg Mollier h-x diagram szerint a kapott hőfelhasználás $3,06 \frac{MJ}{kg_{v\acute{z}}}$. Ez a 2,1-os eltérés azt mutatja, hogy a rendszerben hőveszteségnek kell lennie.

Azonban itt meg kellett állnunk egy pillanatra és újra megnéznünk az 1.3. fejezet 1. táblázatát. Itt azt figyelhettük meg, hogy a hőszugárzás relatív alacsony hőmérsékletkülönbség esetén nagyságrendileg csak a felét adja az összes hőveszteségnek, ahol a másik fele a konvektív hőtranszportból fakad. Erre a tézisre felépített számítás végén az 52. egyenlet eredményeképpen azt kaptuk, hogy a bevitt energia 1,56%-a válik hőveszteséggé a meleg oldalon és távozik a falakon keresztül konvektív és sugárzott hő formájában.

Ha a kapott 1,56% hőveszteségnek megfelelő földgázzal – 71,67 MJ – csökkentjük Nm^3 -re – $2,1 Nm^3$ – vonatkoztatva a 3.1.1. fejezetben látott számítás bemenő energia adatát és a számítást e változtatás mentén számoljuk végig, akkor a földgáz alapon számított fajlagos hőfelhasználás új értéke $3,085 \frac{MJ}{kg_{v\acute{z}}}$. Látható tehát, hogy a veszteségekkel csökkentett kalkuláció, már 1%-on belüli közelségbe hozta a két fajlagos számítási metódust.

A kérdés továbbra is adódik, hogy miért nem egyezik a két számítás? Miért mutat a fajlagos hőfelhasználás $MJ/kg_{v\acute{z}}$ -re vetítve 2,1 %-os veszteséget és miért kapunk a *Fáy-féle* aránypár felhasználásával csak 1,56%-ot. A válasz részben a tényekben és a limitációkban lehet elrejtve.

Az egyik ilyen tény, hogy a vizsgálatok nem ugyanazon a napon történtek, de közel azonos feltételek mentén (lásd 2. és 3. táblázat), melyre nagyon kellett ügyelnem. A hőtechnikai felmérés időpontja után 5 nappal tudtam elkészíteni a hőkamerás vizsgálatokat. Ennek oka sajnos nagyon egyszerű volt: az eső. A fentebb leírtak szerint – az 1.6.2. fejezetben – a csapadék képes eltorzítani a hőkamerás mérést. Ezért várnom kellett olyan környezeti feltételre, amely a hőtechnikai méréssel megegyező és biztosítani tudja a hőkamerás felvételek elkészítésének optimális időjárási körülményeit egyszerre. Ez a tény azonban nem változtat a hőszugárzás mérés metodikájának eredményességén, csupán a fajlagos hőfelhasználással történő összehasonlításban jelenthet korlátozó tényezőt.

Az időjárásból fakadó másik fontos tény az, hogy a környezeti hőmérséklet meglepően kedvező volt a szárításhoz. Ez csökkentette a felületi hőveszteség mértékét is, hiszen 15,9 °C mellett nemcsak a szárítandó kukorica hőmérsékletének növelése igényelt kisebb energiát.

Szintén képes torzítani az eredményt a vizsgált felület inhomogenitása, melyet a 3.3 fejezetben és 7. ábra segítségével bemutattam. Itt igyekeztem minden eszközzel és a legjobb közelítéssel megadni a felület emissziós tényezőjét, azonban a felület sávos korrodáltsága okozhatott olyan szórást az ε értékében, amely a fent keresett veszteség különbséget adhatja.

Valamint meg kell említenem, hogy 3.4. fejezetben bemutatott konvektív hőátadásból származó veszteségbecslés, s mint ilyen okozhat eltérést a kapott eredmény kimenetében.

Javaslatom a mérési metódus továbbfejlesztésére irányul:

- 1) A hőkamerás mérések kellően homogén felület mentén jó közelítéssel képesek megadni a felületi hőmérsékletet, amely a legtöbb vonatkozó számítás egyik bemenő adata. Itt nagy figyelemmel kell lenni a korrekt emissziós tényező meghatározására.
- 2) A termográfia legnagyobb kérdése mindig az időjárás. A méréseket csak megfelelő időjárási körülmények között, avagy olyan kontrollált feltételek mentén lehet jól végezni, mint egy laboratórium.
- 3) Nem szabad megfeledkezni arról sem, hogy ezen, a szárítóknál jellemző relatív alacsony hőmérsékletkülönbségen önmagában nem számolhatunk csak a hősugárzás okozta veszteséggel. Mindenképpen érdemes számolni – ez jóval túlmutat a jelen dolgozat terjedelmén – a kísérletezéssel és ezzel összefüggésben a modellszáritó lehetőségével, mely lehetőség jelen javaslati sor 2. pontjára is visszautal, hiszen megfelelő körülményeket teremtené a termográfának is.
- 4) A hasonlósági egyenletek használhatóak a hőátadás kiszámítására és így a hőveszteség kalkulálására is, azonban ezen számításoknál nagy figyelemmel kell lenni az áramlás természetére, illetve az alkalmazott modellszáritó esetében a geometriai viszonyokra is.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az általam bemutatott hőveszteség vizsgálat két részből állt. Egyrészt a Cimbria szemestermény-szárító hőtechnikai vizsgálatából, ahol meghatároztam a berendezés fajlagos hőfelhasználást földgáz alapon és Mollier h-x diagram segítségével. Másrészt arra kerestem a választ, hogy a szárító meleg oldalának sugárzott hőveszteséget meg tudom-e határozni termográfia és speciális szoftverek segítségével, illetve mennyire pontosan adja meg a sugárzással leadott energia a berendezés teljes felületi hőveszteségét.

Azt gondolom, hogy termográfia, mint eszköz használható felületi hőmérséklet esztimációjára, azonban különös gondot igényel minden befolyásoló körülmény és feltétel optimális meghatározása és betartása. Ezen a ponton ismét kiemelném az esztimáció szót. Nagyon jól lehet becsülni egy ekkora berendezés esetében, mint egy szemestermény-szárító a kérdéses hőmérsékletet – ha minden feltétel adott – azonban 100% pontosságról itt nehéz beszélni.

Ugyanígy látom azonban a hasonlósági egyenletek kérdését is. Nagyon közel lehet kerülni a pontos szám adatokhoz, de ahhoz mérések és nagyon pontos feltétel meghatározások szükségesek.

Azonban a szárítók esetében jelen tudásunk szerint ez a két módszer – a hasonlósági egyenletek és a termográfia – az olyan eszközök, melyekkel meghatározható a berendezés hővesztesége. Összességében jómagam rengeteget tanultam a vizsgálat során a termográfiairól, az alkalmazott szoftverek lehetőségeiről és képességeiről, valamint kutatásom során volt lehetőségem mélyebben ismerkedni a hasonlósági egyenletekkel és a hőtan ezen ágával.

És talán a következő idézet jól mutatja be azt, hogyan éreztem magam a kutatás és vizsgálat során, mellyel zárnám összefoglalómat:

*„A valódi örömforrás a munka maga, az hogy egyik nap előrébb vagyok, mint az előző nap.
Ez az örömforrás.”*

(Stépán Gábor)

FELHASZNÁLT IRODALOM

Internetes irodalom:

INTERNET 1: Effect of heat insulation on the energy consumption of recirculating mixed-flow batch grain dryer | Agricultural Engineering International: CIGR Journal (letöltés ideje: 2023.10.31.)

INTERNET 2: Bevezetés a hőszigetelés elméletébe (oszk.hu) (letöltés ideje: 2023.11.01.)

INTERNET 3: Termográfiai-kisokos.pdf (testo.com) (letöltés ideje: 2023.11.02.)

INTERNET 4: Thermal Imaging Software Download: Fluke Connect Desktop | Fluke (letöltés ideje: 2023.11.03.)

INTERNET 5: Hőtechnika (betonopus.hu) (letöltés ideje: 2023.11.05.)

INTERNET 6: Downloads, Prices, GTC | AHH Software: Zeller Consulting Suisse: HVAC Applikationen (zcs.ch) (letöltés ideje: 2023.11.08)

INTERNET 7: <https://antti.fi/en/products/dryers/dryer-houses/> (letöltés ideje: 2023.11.09)

Könyvek és folyóiratok:

[1] Antal T. (2017): A terményszárítás közben fellépő veszteségek elemzése. *Őstermelők lapja* 2017.5 pp 36-39.

[2] Antal T. – Szászi M. (2022) RIELA GDT 200 Típusú Gabonaszárító Ellenőrző Vizsgálata. *Acta Academiae Nyíregyhaziensis, Nyíregyháza*

[3] Barótfi I. (1993): *Energia Felhasználói Kézikönyv*, Környezet-technikai Szolgáltató Kft, Budapest pp. 491-492

[4] Beke J. (1994): *Hőtechnika a mezőgazdasági és az élelmiszeripari gépészetben*, AGROINFORM kiadó és nyomda kft, Budapest. pp. 163-206

[5] Beke J. (1997): *Terményszárítás*, AGROINFORM kiadó és nyomda kft, Budapest

[6] Garbai L. (1988): *A hőveszteség mérése és számítása az ipari energetikában*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, pp 15-16

[7] Író B. (2010): *Hő és Áramlástan*; Universitas-Győr Nonprofit Kft, Budapest, 2010 pp 151-164

[8] Wong H.Y. (1983): *Hőátadási Zsebkönyv*; Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1983 pp 11-16

[9] Cimbria AEG-18R kezelési utasítás és gépkönyv

[10] Testoterm 4510 mérőműszer kezelési utasítás

[11] Fluke Ti25 kezelési utasítás