

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ÉPÜLET GÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK

SCHNEIDER GYULA - VÁRKONYI ZSOMBOR

Paradicsomszárítás vizsgálata és modellezése

Szárítás időbeli lefutásának analitikus modellezése a szárítási paraméterek függvényében
TDK

Konzulens:

Dr. Örvös Mária
Egyetemi docens

Budapest, 2014

Szerzői jog © Várkonyi Zsombor, Schneider Gyula, Dr. Örvös Mária 2014.

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék.....	3
Jelölések jegyzéke	4
1. Bevezetés.....	6
2. Mérési elrendezések	7
2.1. Szárítókamrás nedvességmeghatározás	7
2.2. Félüzemi konvekciós szárító	9
2.3. Laboratóriumi konvekciós szárító	10
2.4. Infrasarkan szárító	12
3. Matematikai modellek	12
3.1. Nedvességtartalom időbeli változása	12
3.2. Energiaigény három féle meghatározása	13
3.3. Hőátadási tényező időbeli változása.....	14
3.4. Infrasarkanzással beadott hő.....	17
3.5. Tömeglefutás modellezése.....	24
3.6. Hőmennyiségek megoszlása	26
4. Eredmények értékelése	29
4.1. Félüzemi konvekciós szárítás eredményei.....	29
4.2. Laboratóriumi konvekciósszáritás eredményei	30
4.3. Hőteljesítmények megoszlása a konvekciós mérés során.....	32
4.4. Infrasarkan szárítás eredményei.....	33
5. Összefoglalás/Eredmények értékelése.....	35
6. Felhasznált források	37
7. Summary.....	38

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyükönél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	felület	m^2
a	konstans	1
a	hőfokvezetési tényező	m^2/s
b	konstans	1/min
c	fajhő	$\text{J}/\text{kg}/^\circ\text{C}$
C	korrekciós tényező	1
D	átmérő	m
e	fajlagos energiafelhasználás	kJ/kg
$E1$	elméleti hőenergia igény	J
$E2$	tényleges hőenergia igény	J
g	nehézségi gyorsulás	m/s^2
h	magasság	m
m	tömeg	g
MR	nedvességtartalom arány	1
n	darabszám	1
Nu	Nusselt-szám	1
$P1$	elméleti hőteljesítmény	W
$P2$	leadott hőteljesítmény	W
$P3$	szárítási hőteljesítmény	W
Pr	Prandtl-szám	1
Q	sugárzási hőteljesítmény	W
q	fajlagos sugárzási hőteljesítmény	W/m^2
r	látens hő	J/kg
r	sugár	m
Ra	Rayleigh-szám	1
Re	Reynolds szám	1
t	idő	min
t	hőmérséklet	$^\circ\text{C}$
v	levegő sebesség	m/s

X	száraz tömegre vonatkoztatott nedvességtartalom	$\text{kg}_{\text{víz}}/\text{kg}_{\text{száa}}$
x	nedves tömegre vonatkoztatott nedvességtartalom	$\text{kg}_{\text{víz}}/\text{kg}_{\text{na}}$

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	hőátadási tényező	$\text{W}/\text{m}^2/\text{C}$
β	köbös hőtágulási együttható	$1/^\circ\text{C}$
ε	emissziós tényező	1
φ	levegő relatív nedvességtartalom	1
φ	térszögarány	1
λ	hővezetési tényező	$\text{W}/\text{m}/^\circ\text{C}$
λ	hullámhossz	nm
ν	kinematikai viszkozitás	m^2/s
ρ	sűrűség	kg/m^3
σ	Stefan-Boltzman állandó	$\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4$

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
0	kezdeti állapotban vett érték
be	belépési értékre vonatkozó
e	egyensúlyi értékre vonatkoztatott
G	szárítógázra vonatkozó
i	aktuális időpillanatra vonatkoztatott érték
IR	besugárzási érték
k	környezeti érték
ki	kilépési értékre vonatkozó
kv	konvekciós hőátadásra vonatkozó érték
max	maximális érték
P	paradicsomok felületére vonatkozó
p	párolgási értékre vonatkoztatott
sug	sugárforráshoz tartozó érték
v	végző állapotban
$veszt$	veszteséget jelentő tag
$vill$	villamos teljesítményre vonatkozó érték

1. BEVEZETÉS

A paradicsom világszerte egy általánosan termesztett zöldségféle, amelyet számos formájában fogyasztanak a kiváló íze és az emberi szervezetre gyakorolt jótékony hatásai miatt. [1]. A paradicsom friss állapotában romlandó termék, ezért az egyenletes piaci ellátás érdekében, tartósítási eljárás alkalmazása szükséges [2]. Ennek egyik módja a szárítás [3]. A szárítás történhet természetes módon, a Nap sugarai által, ill. mesterséges módon, pl. konvekciós úton, hőszugárzással, vagy mikrohullámmal. A mesterséges szárítás előnye, hogy jelentősen csökkenthető a szárítási idő, ipari méretekben is alkalmazható és független az éghajlati viszonyoktól [4]. A paradicsom beltartalmi értékeinek megőrzése céljából, valamint a szárítás nagy energia igénye miatt fontos a szárítási paraméterek gondos megválasztása és az energia felhasználás ismerete.

A mesterséges szárításhoz igényelt nagy energia csökkentése végett számos kísérletet végeztek. Ezek során jellemzően természetes forrásból nyert hőt, például a Nap sugárzási hőjét módosítva, koncentrálnak használják az ipari folyamat során. Blake R. kísérletében parabolatükrökkel koncentrált napsugárzással szárított paradicsomokat, így a fejlődő országok számára lehetővé téve a konzerválás egy olcsó alternatíváját [4]. A szoláris szárítás nehezen definiálható analitikusan, hiszen a leggyakrabban használt hőátadási egyenletek, hőátadási tényezők ilyen esetre nem érvényesek. Ezért a folyamatot jellemzően a mért eredményekből indulva modellezik [8]. Az időbeli tömegcsökkenés mért pontjaira függvényt illesztve [5] a függvény paramétereinek és a szárítás jellemzőinek kapcsolatát, matematikai összefüggését már vizsgálhatjuk.

A szárítási folyamatokat számos aspektusból meg lehet vizsgálni vagy éppen összehasonlítani. A mai világban a kiadás az egyik legmeghatározóbb paraméter, ezért a folyamatokat gyakran a költséget erősen befolyásoló energiafelhasználás szempontjából vizsgálják. Az energiafelhasználás megadható fajlagos értéként, melynél a konvektív hőátadásból vagy besugárzott energiából meghatározott energiaigényt a paradicsom kiindulási tömegével osztjuk el [7].

TDK dolgozatunk célja, hogy konvekciós és infrasugaras paradicsomszárítás leíró összefüggéseit rendszerezve felállítsunk egy olyan matematikai modellt, amely segítségével vizsgálható az egyes szárítási paraméterek változtatásának hatása. Ehhez először bemutatjuk az általunk használt szárítási mérések elrendezését, majd az elméleti alapokon nyugvó matematikai modelleket és végül a mért és számított eredményeket összekapcsoljuk és értékeljük.

2. MÉRÉSI ELRENDEZÉSEK

A paradicsom szárításával foglalkozó irodalmak különböző hőhözlési módok mellett, változó paradicsom fajták szárítási eredményeit közlik. A célul kitűzött matematikai modell felállításához szárítási méréseket végeztünk, melyek során megvizsgáltuk a paradicsom nedvességtartalmának, hőmérsékletének, felület változásának stb. alakulását, különböző szárítási módok esetén.

2.1. Szárítókamrás nedvességmeghatározás

Üzemi körülmények közötti szárítási feladatoknál a száradó anyag nedvességtartalmát leggyakrabban a nedves tömegről vonatkoztatott nedvességtartalommal $x \left[\frac{kg_{v\acute{e}z}}{kg_{nedves\ anyag}} \right]$ adják meg. A paradicsomok jellemző, nedves tömegről vonatkoztatott kiindulási nedvességtartalma 95% [3]. Ennek megállapítása szárítókamrás mérés során 105 °C hőmérsékleten, 4 órán át történik [3]. A saját méréseinkhez használt paradicsomok kiindulási nedvességtartalmának meghatározására szárítókamrást mérést végeztünk a tanszéki laboratóriumban (2.1. ábra) szeletelt és negyedelt paradicsomokra. A mérés 110 °C kamrahőmérsékleten, 24 órán keresztül tartott. A mérés során a paradicsomok átlagos felületi hőmérséklete 104 °C volt. Mértük a paradicsomok tömegét, felületét és emissziós tényezőjét. Végül a kiszárított termékek végső nedvességtartalmát szilikagéllel adszorbeáltuk egy légmentesen zárható tartályban.



2.1. ábra Tanszéki szárítókamra a kezdeti nedvességtartalom meghatározásához

A szárítókamrás mérés eredményei				
minta	1	2	3	4
típus	szelet	szelet	negyed	negyed
m_0 (g)	21,9	21,3	22,8	20,5
m_v (g)	1,05	1,3	1,1	1,16
Δm (g)	20,85	20	21,7	19,34
X_0 (%)	95,21%	93,90%	95,18%	94,34%

2.1. táblázat: A szárítókamrás mérés eredményei nedvességtartalom meghatározásához

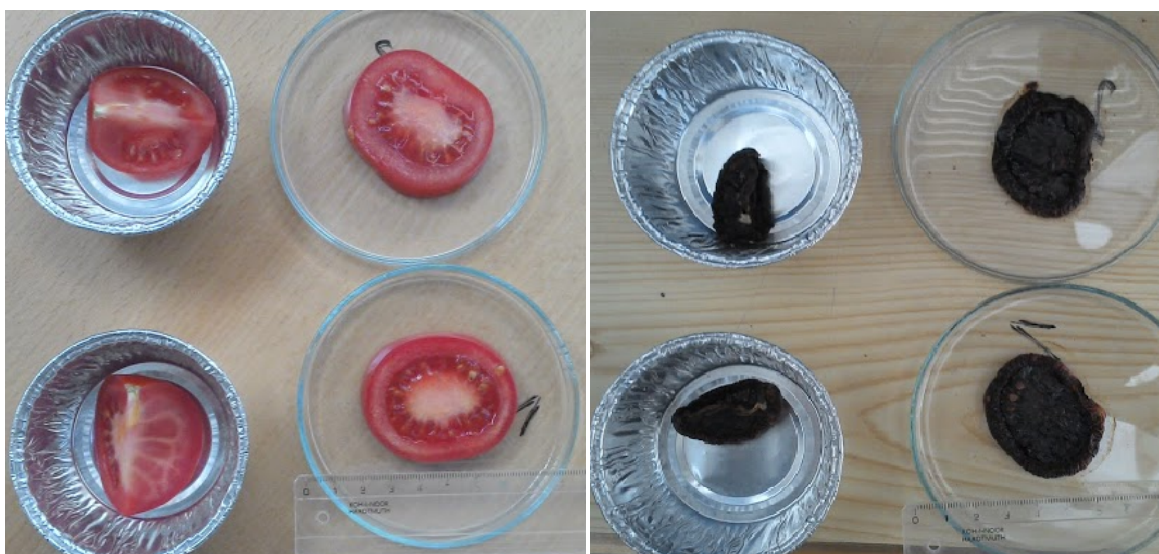
A kezdeti (m_0) és végállapothoz (m_v) tartozó paradicsomtömegeket egy digitális, Sartorius LA1200S típusú mérleggel, a hőmérsékleteket egy digitális, TM6801B típusú termométerrel mértük. Feltételeztük, hogy 24 óra elteltével a végső paradicsomtömeg megegyezik a szárazanyag tömegével, így meghatározható a paradicsomok kezdeti nedvességtartalma. Esetünkben a kezdeti nedvességtartalomra átlagosan 94,65 % adódott, amely jó egyezést mutat az irodalmi adatokkal. A mérés adatai a 2.1. táblázatban olvashatók.

Megfigyeltük, hogy a száradás során jelentősen változott a paradicsomok száradó felülete, mind átmérő, mind magasság szempontjából. A tömeghez hasonlóan, ezt a paramétert is mértük a szárítás előtt és után. A paradicsomszeletekre kiadódó relatív felületcsökkenés 36 % volt (2.2. táblázat). A 2.2. ábra alapján látható, hogy a paradicsomok vágott felülete ellipszis alakú, de mivel a konvektív hőátadás során gömbbel közelítettük, így az ellipszis kis- (b) és nagytengelyének (a) az átlagából, kör geometriához tartozó egyenértékű átmérőt számoltunk, hogy ez a feltevés továbbra is igaz lehessen. Ebből az átmérőből határoztuk meg a paradicsomok felületét.

A paradicsomok száradó felületének változása					
idő [h]	a [mm]	b [mm]	d _e [mm]	A [cm ²]	A ₀ /A _{24h}
0	55	45	50	19,63	1
24	45	35	40	12,56	0,64

2.2. táblázat: A szelet paradicsomok vágott felületének változása teljes kiszáritás során

A szárítókamrás vizsgálat során mértük a paradicsomok felületének emissziós tényezőjét (ϵ). Az emissziós tényező mérését kézi, IR900-30S Voltcraft típusú pirométerrel végeztük, az iparban megszokott módszerrel. Ehhez egy pontosan kalibrált tapintó hőmérő által mutatott felületi hőmérsékletet összehasonlítottuk a pirométeren leolvasható pillanatnyi hőmérséklettel. Ez után a pirométeren állítható emissziós tényező értékét addig módosítottuk, amíg annak értéke megegyezett a tapintó termométeren leolvasható értékkel.



2.2. ábra Paradicsomok a szárítókamrás mérés előtt és után

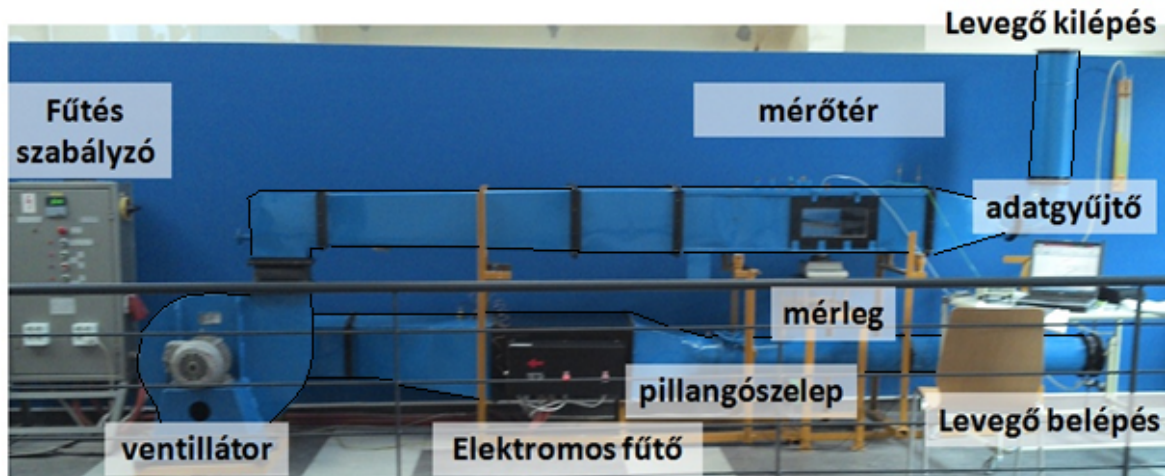
Azt tapasztaltuk, hogy az ε értéke 0,8..0,9 között mozgott, majd miután a paradicsom már teljesen kiszáradt és elkezdett szenesedni, ez az érték elérte az egyet, azaz sugárzás szempontjából abszolút fekete testként kezelhető.

A paradicsomról készült kamrás szárítás előtti és utáni képek a 2.2. ábrán láthatók.

2.2. Félüzemi konvekciós szárító

A szárítócsatornában történő szárítás során, a csatornában áramló felmelegített levegő a paradicsomoknak konvektív hőátadással hőt ad le, ami az anyag száradását eredményezi. Ipari méretekben kivitelezve, az alacsony költségek szempontjából egyik fontos jellemző a szárítás energiaigénye. Számos kísérleti mérés dokumentációja olvasható interneten, amely ezen érték meghatározására irányul [3]. Mindezek során első lépésként a friss paradicsomokat jellemzően megtisztítják, szín- és méret szerint válogatják, majd a száradási tulajdonságok javítása érdekében, a felületüket oldatba merítéssel kezelik. Ezután az előkészített paradicsomokat felezik, majd egy perforált tálcára helyezik, amelyet egy állandósult állapotban üzemelő szárítócsatornába helyeznek és ott a kívánt mértékig kiszáritanak.

Mi a paradicsomok szükséges szárítási idejének vizsgálata céljából konvekciós méréseket végeztünk félüzemi konvekciós szárítócsatornában (2.3. ábra). A paradicsomok jellemző, nedves tömegre vonatkoztatott kiindulási nedvességtartalma 95% [3], melyet a szárítás során 10 %-ra csökkentenek [6], mert ilyen állapotban megőrzi pozitív tulajdonságát (szín, rehidratációs képesség, íz stb.), és emellett sokáig eltartható.



2.3. ábra Félüzemi konvekciós szárító (tanszéki laboratórium)

A 2.3. ábrán látható elrendezésben a környezeti levegő a belépő csompon lép be a ventilátor szívóágába, majd áthalad egy elektromos fűtőn, amely a szárítógáz hőmérsékletére melegíti azt. A ventilátoron keresztülhaladva a nyomócsomponba jut, ahol keresztülhalad a mérőtéren. Itt történik a paradicsomok szárítása. Ezt követően egy függőleges kiömlőnyíláson a környezetbe távozik. A levegő térfogatáramát, így a sebességét egy pillangószelepen megvalósított fojtással állíthatjuk be a megfelelő ér-

tékre, amely szelep az elektromos fűtő előtt van a szívóágba építve. A szárítógáz hőmérsékletét a fűtésszabályzóval állíthatjuk be a kívánt értékre.

A paradicsomok felszíni hőmérsékletét TM6801B típusú termométerrel, a szárítógáz összes paraméterét digitális adatgyűjtőre kötött légállapot távadóval, míg a szárítógáz sebességét mérőperem nyomásesése alapján meghatározott térfogatáramból számoltuk és szárnykerekkes légsebességmérővel ellenőriztük. A vizsgált változó jellemző a száradó paradicsom tömege. Ennek mérését egy adatgyűjtővel összekötött digitális mérleggel végeztük. A tömeget és a belépő levegő állapotjelzőit egy adatgyűjtővel összekapcsolt számítógéppel regisztráltuk ötpercenként.

A konvektív szárítás két fő paramétere a szárítólevegő sebessége (v_G) és hőmérséklete (T_G). Az általunk végzett mérések esetén irodalmi ajánlások alapján adott az utóbbi paraméter értéke, amit úgy vettük fel, hogy az a száradó paradicsomok felületi hőmérsékletét (T_P) ne emelje 60 °C fölé. A szárított termékek szín,- és alakváltozása valamint rehidratációs és egyéb tulajdonságainak megőrzése miatt a szárítógáz hőmérsékletét 70 °C alatt célszerű tartani. A likopin bomlása 70 °C feletti [6], az aszkorbinsav bomlása pedig 60 °C feletti anyag hőmérséklet hatására gyorsul fel [9]. A szárítás során a környezeti levegő relatív nedvességtartalmát (ϕ_0) nem vettük figyelembe, mivel annak értékei a magas szárítólevegő hőmérséklet miatt az egyes esetekben nem térnek el jelentősen egymástól.

A 2.3. ábrán látható berendezésen történő mérések során a szárítólevegő sebességének hatását néztük a tömegcsökkenés szempontjából, felezett paradicsomok esetén. Az egyes mérések főbb paramétereit a 2.3. táblázat tartalmazza.

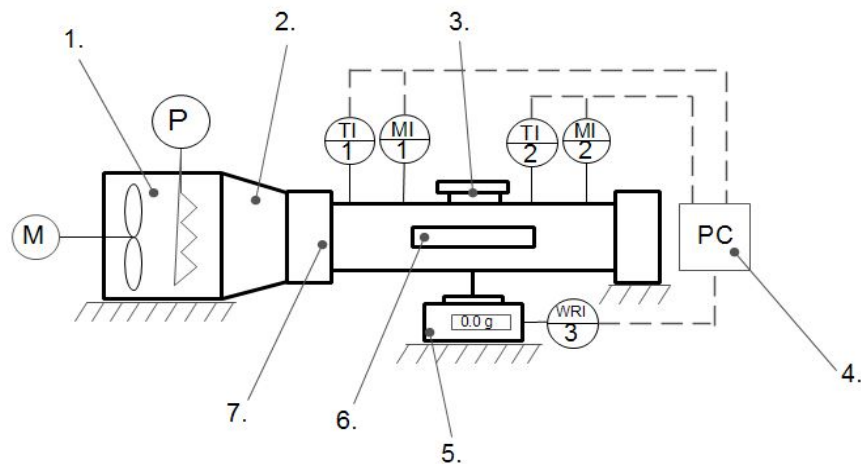
mérés	$\bar{T}_G$ (°C)	$\bar{T}_P$ (°C)	ϕ_k (%)	v_G (m/s)
1	63	52	29%	3
2	58	49	32%	1,5
3	68	61	44%	4,5

2.3. táblázat: Konvekciós szárítási mérések jellemző paramétereit

2.3. Laboratóriumi konvekciós szárító

A paradicsomok szárításához szükséges energia vizsgálata céljából saját kialakítású, kísérleti, konvekciós mérést végeztünk. A nagy kezdeti nedvességtartalommal bíró anyagok szárítása esetén a tényleges energiaigény többszöröse a tömegváltozás és párolgáshő szorzatából számított (csak a párolgáshoz szükséges) energiaigénynél, így csak a tömegváltozás mérésből nem kaphatunk pontos képet a hőigényről. A valószínű beadott energia szárítólevegő légállapotának megváltozásából számítható. Az általunk használt félüzemi szárítóval történő mérés során a szárítandó anyagmennyiséghez (fél paradicsom) viszonyított szárító levegő térfogatáramok (0,3..1 m³/s) olyan nagyok, hogy a légállapotban bekövetkező változásokat a ki- és belépésnél nem tudtuk mérni, mivel, a rendelkezésre álló mérőműszerek méréstartományain kívül estek.

Ezért méréséhez a 2.4. ábrán látható másik kísérleti berendezés felépítésére volt szükség, hogy a mérendő mennyiségek a rendelkezésre álló mérőműszerek mérési határaiba beleessenek.



2.4. ábra Laboratóriumi konvekciós szárító elrendezése

1. fűtőszálas ventilátor, 2. szűkítő elem, 3. beadagoló nyílás, 4. adatgyűjtő számítógép
5. digitális mérleg, 6. kémlelőnyílás, 7. szárítócső

A mérési elrendezésbe a környezeti levegő az M jelű motor hajtotta ventilátoron keresztül lép be. A ventilátor után egy elektromos fűtésen (P) a szárítógáz adott hőmérsékletre melegszik fel. Ezután egy konfúzoron áthaladva (2) elér a szárítótér bevezetéséhez (7). A konfúzor után további áramláskiegyenlítés céljából egy perforált lemezen keresztül lép be a levegő a hengeres szárítótérbe, ahol így végül már egyenletes az áramkép, közel lamináris az áramlás. A szárítótérben egy perforált tálcán helyezkednek el a szárítandó paradicsomok, amely egy digitális adatgyűjtőre kötött mérlegre (5) támaszkodik az alul kivezetett tengelyen keresztül. A szárítógáz jellemzőinek módosítására nem volt lehetőségünk a szabályozás nélküli ventilátor motor és fűtőszál miatt, tehát állandó hőmérsékleten és sebesség mellett vezettük be a szárítólevegőt. A paradicsom méretcsökkenését az oldalsó kémlelőnyíláson (6) figyeltük meg, míg a levegő állapotjelzőket a paradicsomokat tartó tálca előtt és után mértük.

$v_G \left[\frac{m}{s} \right]$	$\dot{m}_G \left[\frac{kg}{s} \right]$	$\bar{T}_G [^{\circ}C]$	$\varphi_0 [\%]$	$T_0 [^{\circ}C]$	$m_{P,0} [g]$	$x_{P,0} \left[\frac{kg_{v\acute{e}z}}{kg_{\acute{o}sszes}} \right]$
0,385	24,61	78,7	26	31	635	0,95

2.4. táblázat A laboratóriumi méretű konvekciós szárítás alapadatai

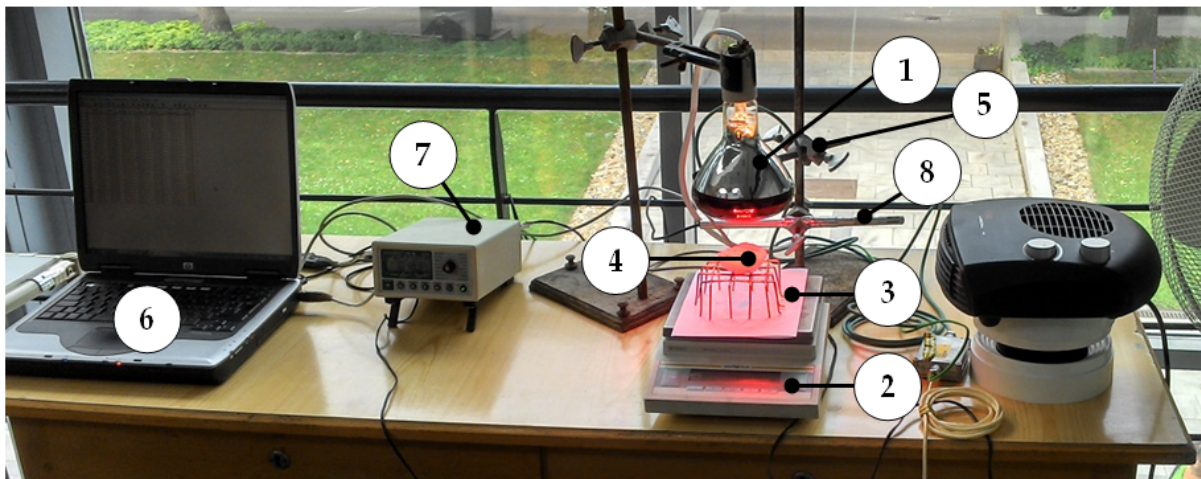
A mérés során, állandó $\dot{m}_{lev}$ levegő tömegárammal szárítottunk m_0 kiindulási tömegű, előkezelés nélküli, felezett paradicsomokat T_G átlagos belépő szárítólevegő hőmérséklet mellett. A mérés során mértük a paradicsomok össztömegét egy adatgyűjtő számítógéppel összekötött WRI-3-as digitális mérleg segítségével, 15 perces mintavételezési idővel, valamint a szárítócsőbe belépő- és az abból kilépő levegő hőmérsékletének és relatív nedvességtartalmának értékeit az 1-es és 2-es mérőkörbeli

levegőállapot távadó segítségével, 1 perces mintavételezési idővel. A mérés kiindulási paramétereinek értékeit az 2.4. táblázat tartalmazza.

2.4. Infrasarkan szárító

Az infrasarkan szárítás vizsgálatához kialakított mérőállomás a 2.6.ábrán látható.

Az állványon elhelyezett 150 W-os infraizzó (1) alatt található digitális mérlegen (2) elhelyeztünk egy rácsos tartót (3) a paradicsom (4) alatti légáramlás biztosítása végett. A paradicsom hőmérsékletét – tapintó hőmérővel kalibrált - infrahőmérővel (5) mértük. A számítógépre (6) kötött adatrögzítő (7) mentette a környezeti levegő vizsgált állapotjelzőit (8) , a felületi hőmérsékletet és a tömeget. Az így, vágott felületével felfelé elhelyezett felezett paradicsomot adott magasságból besugározva, oldalról adott sebességű környezeti levegővel fújva regisztráltuk a tömeget tíz percenként. A kívülről érkező napsugarak kiküszöbölésére az ablak felőli oldalról takarást helyeztünk el.



2.5. ábra Infrasarkan szárítás vizsgáló állomás

3. MATEMATIKAI MODELLEK

3.1. Nedvességtartalom időbeli változása

Száradó anyag nedvességtartalmát leggyakrabban a száraz tömegre vonatkoztatott

$$X = \frac{m_{\text{víz}}}{m_{\text{szárazanyag}}} \text{ vagy a nedves tömegre } x = \frac{m_{\text{víz}}}{m_{\text{szárazanyag}} + m_{\text{víz}}} \text{ vonatkoztatott nedves-}$$

ségtartalommal szokás jellemezni. A paradicsomok jellemző, nedves tömegre vonatkoztatott kiindulási nedvességtartalma 95% [3], melyet a szárítás során 10 %-ra csökkentenek [4].

A szárítás során a paradicsomok tömegének változását az aktuális- és a kezdeti, száraz anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom arányával MR fejezhetjük ki (3.1.1) összefüggés szerint [3].

$$MR = \frac{X_i - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.1.1)$$

ahol X_e $[kg_{\text{víz}} / kg_{\text{szárazanyag}}]$ az egyensúlyi, száraz anyagra vonatkoztatott abszolút nedvességtartalom, amely esetünkben az X_0 és X_i értékekhez képest jelentősen kisebb, így annak elhagyása nem okoz jelentős hibát a számításainkban, így $MR = X_i / X_0$ [3].

Paradicsom szárítás esetén a mérési adatokra számos modell szerinti görbe illeszthető. Mérési adatainkra legjobban illeszkedő modell a Handerson-Pabis által leírt (3.1.2) összefüggés (H-P modell) [3,16].

$$MR = a \cdot e^{-bt} \quad (3.1.2)$$

Ahol a és b paraméterek a szárítólevegő sebességétől és hőmérsékletétől függenek. A modell jó illeszkedését számos méréssel igazoltuk [8]. Ha igaznak tekintjük, hogy kezdetben X_0 a nedvességtartalma a paradicsomnak, akkor $MR(t=0) = 1$, tehát $MR = 1 = a \cdot e^{-b \cdot 0} = 1 \cdot 1$ vagyis $a = 1$ és csak b függ a szárítási jellemzőktől. Az illusztrálásként bemutatott mérésre illesztett görbe egyenlete 4.2. ábrán látható.

3.2. Energiaigény három féle meghatározása

Számításaink során csak a paradicsom által felvett hőmennyiséggel számoltunk, a ventillációs teljesítményt minden esetben elhanyagoltuk. Felhasználva a száraz anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom értelmezését, valamint (3.1.1) és (3.1.2) egyenleteket, a nedves anyag tömegének időbeli változása felírható:

$$m(t) = m_{\text{szárazanyag}} \cdot X_0 \cdot a e^{-bt} + m_{\text{szárazanyag}} \quad (3.2.1)$$

Képezve a nedves tömeg idő szerinti deriváltját:

$$\frac{d m(t)}{dt} = -b \cdot m_{\text{szárazanyag}} \cdot X_0 \cdot a e^{-bt} \quad (3.2.2)$$

A szárítás elméleti hőteljesítmény igénye értelmezhető az időegység alatti nedvesség csökkenés és a fázisváltozási hő (r_p) szorzataként:

$$P_1(t) = -\frac{d m(t)}{dt} \cdot r_p \quad (3.2.3)$$

A hőteljesítmény n pontra számított átlagát megszorozva a teljes szárítási idővel ($t_{\text{végső}}$) az átlagos elméleti hőigény adódik:

$$E_1 = \bar{P}_1 \cdot t_{\text{végső}} = t_{\text{végső}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{dm}{dt} \right)_i r_p \quad (3.2.4)$$

Konvekciós szárítás esetén a tényleges energia igény (E_2) a szárítólevegő állapotváltozásából számított, leadott hőteljesítmény (P_2) és a szárítási idő szorzata [7]:

$$E_2 = P_2 \cdot t = A \cdot v_G \cdot \rho_G \cdot c_G \cdot (T_{G,be} - T_{G,ki}) \cdot t \quad (3.2.5)$$

ahol $A[m^2]$ a szárítócsatorna keresztmetszete, $v_G[m/s]$ a szárítógáz áramlási sebessége, $\rho_G[kg/m^3]$ sűrűsége, $c_G[kJ/(kgK)]$ fajhője, $T_{G,be}$ $T_{G,ki}[^\circ C]$ belépési és kilépési hőmérséklete és $t[s]$ a szárítási idő.

E_2 értéke minden esetben nagyobb E_1 -nél, mivel E_1 számításánál a diffúziós ellenállást valamint az anyag felmelegítésének hőigényét és a hővesztéseket elhanyagoltuk. A két érték közötti kapcsolat C korrekciós tényezővel hozható létre:

$$E_1 \cdot C = E_2 \quad (3.2.6)$$

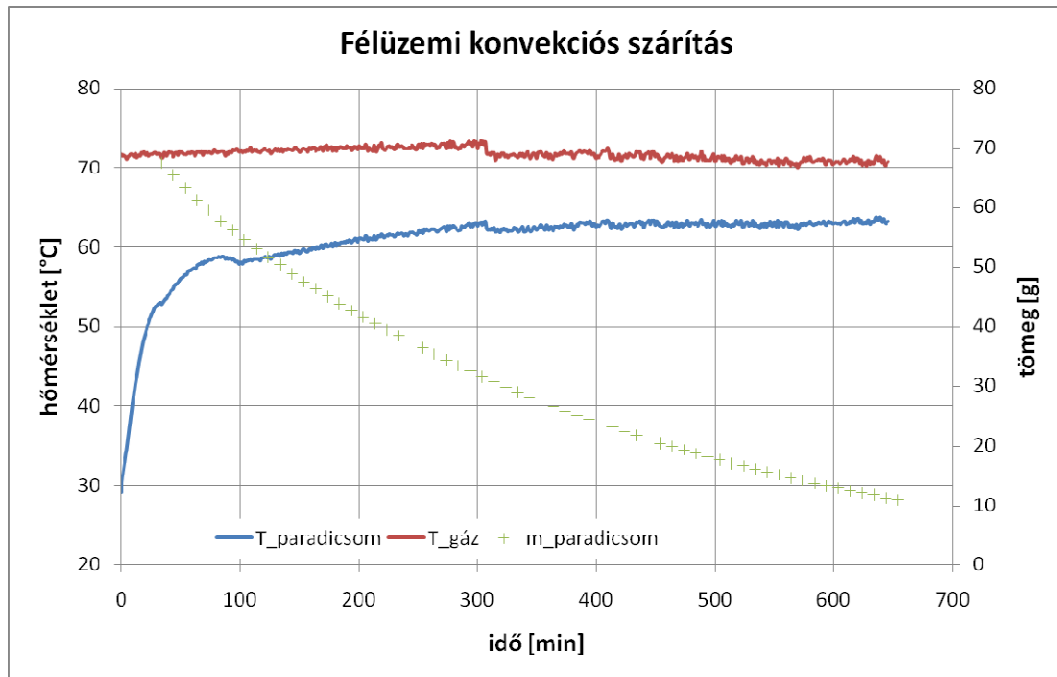
A szárítás hőteljesítménye meghatározható a hőátadási tényező, a hőátadó felület és a szárítógáz (T_G) valamint az anyag felületi hőmérséklet (T_P) különbségével:

$$P_3 = \alpha \cdot A_{paradicsom} \cdot (T_G - T_P) \quad (3.2.7)$$

A szárítás energiaigényének jellemzésére a fajlagos energiafelhasználást használják $e[kJ/kg]$, amely a teljes energiaigény $E[kJ]$ és a kiindulási tömeg $m_0[kg]$ hányadosa [7]: $e[kJ/kg] = E/m_0$

3.3. Hőátadási tényező időbeli változása

A tényleges szárítási teljesítmény $P_2[kW]$ a szárítólevegő állapotváltozásából számított, leadott hőteljesítmény a (3.3.1) összefüggés szerint, a szárítás bármely szakaszára felírva azt.



3.1.ábra: A paradicsom felszíni hőmérséklete, tömege, valamint a szárítógáz hőmérséklete a szárítási idő függvényében

$$P_2 = A \cdot v_G \cdot \rho_G \cdot c_G \cdot (T_{G,be} - T_{G,ki}) \quad (3.3.1)$$

Több mérés keretében elvégzett konvekciós szárítások során az egyes mért jellemzők változása minden esetben egy jól megfigyelhető jelleg szerint alakult. A továbbiakban e jellegek általánosítása szolgál az általunk felépítendő matematikai modell alapjául. A szárítógáz hőmérséklete, a paradicsom hőmérséklete és a hőmérséklete a példaként kiemelt mérésből származó 3.1 ábra szerint alakultak jellegre.

Megfigyelhető, hogy a klasszikus száradási görbével ellentétben, ahol a szárítandó anyag hőmérséklete a szárítógáz hőmérsékletéhez tart, esetünkben a 10% nedvességtartalom eléréséhez szükséges idő alatt a szárítólevegő hőmérséklete állandósulni látszik. Természetesen, ha a teljes nedvességtartalom eltávozásáig (közel 1%-ig) végeznénk a szárítást, akkor a paradicsomok felületi hőmérséklete itt is a szárítógáz hőmérsékletéhez tartana. Azonban az előbbi feltételezés mellett a mi méréseink során a szárítás a hőmérséklet hajtóerő szempontjából két szakaszra bontható, egy kezdeti és egy állandósult szakaszra. A kezdeti szakaszban a felületi hőmérséklet, telítődéses jelleggel tart egy kvázi állandósult értékhez. A második szakaszban, 10%-os nedvességtartalomig végzendő szárítás esetén a paradicsom és a szárítógáz közötti hőfok hajtóerő közel állandó. Ennek ellenére a száradás mértéke (amely a szárítandó anyag tömegcsökkenéséből van meghatározva) változatlan jelleggel, exponenciálisan csökken.

A mért tömegcsökkenésből meghatározható a szárításhoz szükséges elméleti szárítási teljesítmény, vagyis a 3.2 részben leírt párolgáshővel számított hőteljesítmény (3.2.3) összefüggés szerint. Az általunk végzett szárítási tartományban ezen P_1 értéke HP modell alapján paraméterezett görbével írható le.

Ez a görbe a teljes t tartományban monoton csökkenő jellegű. A laboratóriumi elrendezésben végzett mérés során azt tapasztaltuk, hogy a szárítógáz állapotjelzőiből számított teljesítmény (3.3.1) jelentősen nagyobb a tömegcsökkenés alapján számítottnál (3.2.3). A kettő közti kapcsolat megállapításához az eddigi modell további fejlesztése szükséges. A szárítási teljesítmény felírható a hő- és anyagátadási tényező ismeretében is (3.2.7) összefüggés szerint. Írjuk fel ezt most $i+1$ és i időpillanatra.

$$\frac{P_{1,i+1}}{P_{1,i}} = \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{A_{i+1}}{A_i} \cdot \frac{(T_G - T_p)_{i+1}}{(T_G - T_p)_i} \quad (3.3.2)$$

- A monoton csökkenő tömeg miatt $P_1(t)$ monoton csökken, azaz $i+1$ -dik időpillanatban kisebb az értéke, mint az i . időpillanatban, tehát a (3.3.2) egyenlet bal oldali hányadosa kisebb lesz, mint 1. Ez alapján a jobb oldalnak is kisebbnek kell lennie 1-nél.
- A fent definiált második szárítási szakaszban a hőmérséklet-hajtóerőt közel állandónak tételeztük fel, így az egyenlet jobb oldalának utolsó hányadosa 1.
- A második hányados a száradó felületek változását fejezi ki. A modellépítés jelenlegi szakaszában a folyamatok jellegét vizsgáljuk, ezért ezt a hányadost vehetjük egy 1-nél kisebb konstans értéknek a zsugorodó felület miatt, és

időfüggését elhanyagoljuk. Méréseink alapján közel lineáris a tömegcsökkenés, de a kis meredekség miatt elég közeli $i+1$ és i pontok esetén akár 1-nek is vehetjük, amely a paradicsomok felületváltozásának teljes elhanyagolását jelenti.

Végeredményben azt kaptuk, hogy az egyenlőség fennállásához a hőátadási tényezők arányának kell megegyezniük az elméleti szárítási teljesítmények arányával.

Ezek alapján kijelenthető, hogy az egyidejű anyag- és hőátadást jellemző hőátadási tényező alakulása a szárítás alatt jellegre megegyezik az elméleti szárítási teljesítmény alakulásával, azaz van egy maximális értéke a szárítás elején és szárítás végéig valamilyen nem lineáris függvény szerint monoton csökken.

A kísérleti elrendezésben mérhető levegő állapotjelzőkből számított teljesítmény-idő függvény tehát adott. Ezt a görbét kell visszakapnunk akkor is, ha a hőátadási tényezőkkel számítjuk ki a paradicsommal közölt hőteljesítményt. Korábbi feltételeink szerint $A \cdot (T_G - T_p)$ értéke állandó a szárítás alatt. Tehát a mért hőteljesítményt leosztva ezzel az állandóval megkapjuk az α -t minden időpillanatra, és végrehajtható egy görbeillesztés, $\alpha(t)$ analitikus meghatározásához. Az illesztett polinommal számolt alfával meghatározható $P_3(t)$ megfelelő illesztés esetén vissza kell adja a mért adatok alapján számolt $P_1(t)$ -et.

A (3.3.3) összefüggés alakjában felírt hőátadási tényező függvénnyel jó közelítéssel visszakapjuk a mérési adatokból számított tényleges szárítási teljesítményt (4.3 ábra).

$$\alpha(t) = \frac{A \cdot \ln(t) - B}{\sqrt{t}} \quad (3.3.3)$$

A szárítási idő minden esetben meghatározható a (3.1.2) egyenletből kifejezve azt. Ha még ismerjük a hőátadási tényező értékét a kezdő és végpontban, akkor e pontok közé a (3.3.3) egyenlet szerinti görbe paraméterei meghatározhatók. A végpontban, ahol a száradó anyag relatív nedvességtartalma eléri az 1 %-os értéket, a hőátadási tényezőt közelíthetjük egy tisztán konvekciós hőátadást feltételezve, hiszen az anyag nedvességtartalma ebben a pontban közel nulla, nincs anyagátadás. Ennek értéke a jelenlegi, száradó anyag geometriája miatt két tagból tevődik össze. A konvektív hőátadási tényező első tagja a paradicsom vágási felületére érvényes, izotermikus síklap feletti lamináris áramlást feltételezve, a második tag pedig a paradicsomra, mint egyedülálló félgömbre felírt kritériális egyenletből határozható meg. A konvektív hőátadási tényező első tagja kifejezhető a hozzá tartozó Nusselt egyenletből a (3.3.4) összefüggés szerint [13].

$$\alpha_{k,1} = \frac{\lambda \cdot \left[\frac{0,6774 \cdot \sqrt{Re} \cdot Pr^{1/3}}{4 \sqrt{1 + (0,0468/Pr)^{2/3}}} \right] \cdot \left(\frac{T_G}{T_p} \right)^{0,12}}{D} \quad (3.3.4)$$

ahol az egyenlet érvényességi tartománya $Re \cdot Pr \geq 100$ és $Re < 5 \cdot 10^5$ és a számított érték hibája ± 20 %. A konvektív hőátadási tényező második tagja kifejezhető a hozzá tartozó Nusselt egyenletből a (3.3.5) összefüggés szerint [13].

$$\alpha_{k,2} = \frac{\lambda \cdot \left[2 + \left(0,4 \cdot Re^{\frac{1}{2}} + 0,06 \cdot Re^{\frac{2}{3}} \right) \cdot Pr^{0,4} \right] \cdot \left(\frac{T_G}{T_p} \right)^{0,12}}{D} \quad (3.3.5)$$

Az egyenlet érvényességi tartománya $0,7 \geq Pr \geq 400$ és $3,5 \geq Re < 7,6 \cdot 10^4$ és a számított érték hibája $\pm 30\%$. A kezdőpontban a hőátadási tényező értékét már egyidejű anyag- és hőátadás melletti feltétel esetén kell meghatározni, hiszen ott nedves anyag száradása történik. A szárítás kezdő pillanatában azt feltételezzük, hogy csak a paradicsomok vágási felületén játszódhatnak le a transzportfolyamatok és ez a felület tökéletesen nedvesített. Az (3.3.1) összefüggésben felírt tényleges szárítási teljesítményt a levegő állapotváltozásából, nevezetesen a hőmérséklet csökkenéséből számítjuk. Azt feltételezzük, hogy a levegő hőmérséklet csökkenéséhez szükséges energia csak a párolgáshővel számított energiából adódik, azaz egy tökéletesen nedvesített felületről történik a párolgás [17]. Ebből következően a (3.3.1) összefüggés kezdeti maximális értékét egyenlővé téve a (3.2.7) kifejezéssel számítható egy hőátadási tényező, amely értéke legyen a kezdőpontbeli érték a (3.3.6) összefüggés szerint.

$$\alpha_0 = \frac{E_{max}}{\frac{n \cdot D^2 \cdot \pi}{4} (T_{G,be,0} - T_{par,0})} \quad (3.3.6)$$

Az $\alpha(t)$ ismeretében a (3.2.7) egyenletből adódik $P_3(t)$ értéke, amelyet a szárítás idejére integrálva jó közelítéssel visszkapjuk a (3.3.1) egyenlet szerint meghatározott tényleges szárítási energiaigényt ($E_1(t)$).

3.4. Infrásugárzással beadott hő

A sugárzásos hőátadás elméleti leírási módja szerint a besugárzott hőmennyiség arányos a sugárzási forrás felületével, a forrás és cél emissziós tényezőjével, a geometriai arányokkal, valamint a hőmérsékletek negyedik hatványának különbségével, ahol a hőmérsékletek Kelvin mértékegységben helyettesítendőek.

$$Q_{IR} = \sigma \cdot A_{forrás} \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varphi_{12} \cdot (T_{sug}^4 - T_2^4) \quad (3.4.1)$$

Hogy ezt az értéket kiszámíthassuk a fenti képletben lévő értékeket meg kell határozunk a mérési elrendezésre is.

3.4.1. Izzószál hőmérsékletet

A kísérletekben alkalmazott izzó (Tungsram infravörös izzó E27 foglalattal 150W) izzószálának hőmérséklete ismeretlen volt, így meg kellett határozni, hogy sugárzási hőteljesítményt tudjunk számolni a későbbiekben. Tudjuk specifikáció alapján, hogy a bevitt villamos teljesítmény 90%-át hő formájában adja le. Az infravörös sugárzás hullámhossz tartománya: $\lambda_{IR} = 780..3000[nm]$

Planck fajlagos sugárzási hőteljesítmény függvénye [13] megadja, az adott hőmérsékleten sugározó test adott hullámhossz tartományig leadott sugárzási teljesítmény részarányát. $q_{IR} = f(\lambda \cdot T)$ Tudjuk, hogy a két hullámhossz között kisugárzott telje-

sítmény a teljes intervallumon kiadott hőtéljesítmény 90%-a, így $0,9 = q_{IR1} - q_{IR2} = f(\lambda_1 \cdot T) - f(\lambda_2 \cdot T)$.

Planck függvénye csak diszkrét értékekre adott, így a megadott pontokra polinomot illesztve függvénnyel közelítettük a $q_{IR} = f(\lambda \cdot T)$ összefüggést, majd a függvényt felhasználva célértékkeresést hajtottunk végre a hőmérséklet függvényében. $0,9 := f(3000 \cdot T) - f(780 \cdot T)$ Ez alapján az izzószál hőmérséklete közelítőleg 3100°C . A kiadott hőtéljesítmény arány és hullámhossz tartomány is csak referencia adat, így minden infrásugárzó esetén mérést kellene végezni a pontosabb hőmérséklet meghatározásához, amely nem témája jelen dokumentumnak.

3.4.2. Paradicsom hőmérséklet

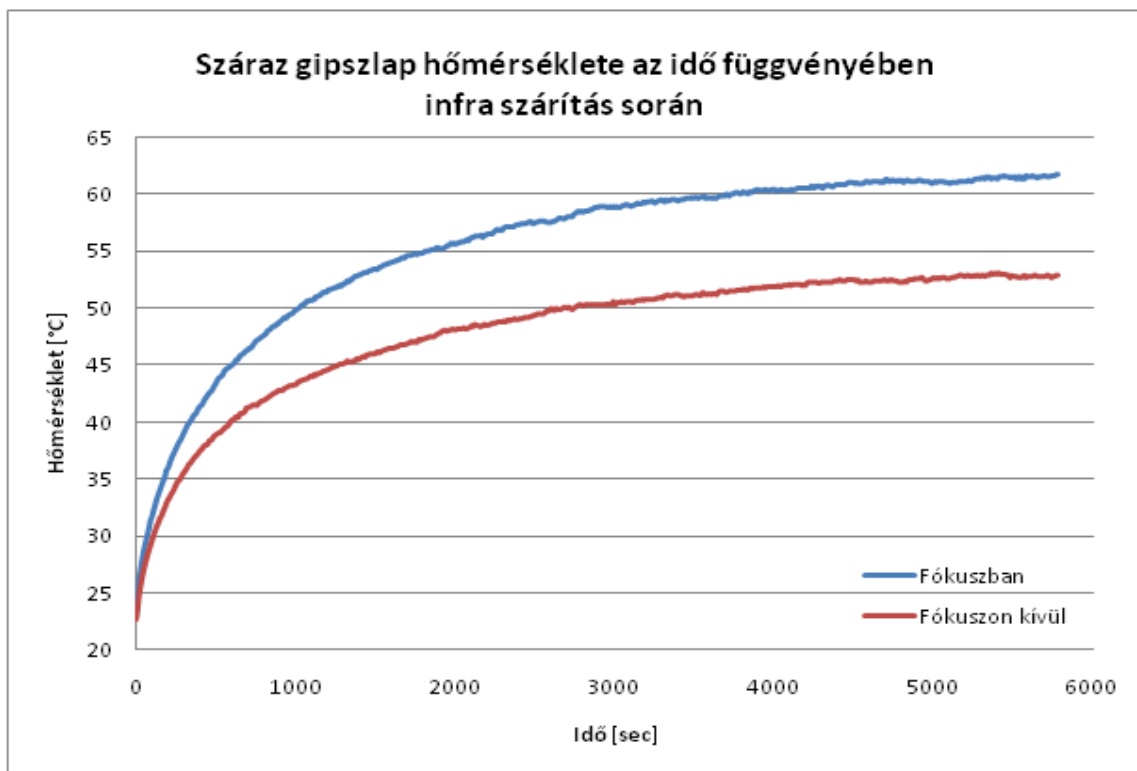
Korábbi mérések bizonyították, hogy a β -karotin és C-vitamin bomlásának elkerülése érdekében [4], valamint a barnulás elkerülése és a piros szín megtartása végett [8] a paradicsom felszíni hőmérséklete nem haladhatja meg a 60°C -t szárítás közben. Az izzószál és a paradicsom hőmérséklete meghatározza a sugárzással átadható hőmennyiség maximumát, amely csökkenthető a bevilágítás szögének és magasságának változtatásával, valamint szükség esetén a beadott villamos teljesítmény csökkentésével.

3.4.3. Izzószál felület közelítése körlappal

A villanykörteben található izzószál kör alakban van elhelyezve, azonban a kör átmérője és a spirális szál vastagsága nem mérhető a körte roncsolása nélkül, ezért egyéb módon kell közelíteni.

A valós kísérlethez hasonló elrendezésben referencia méréseket végeztünk olyan gipszlapokkal, melyekbe korábban termoelemet ágyasztunk. Az izzószál magas hőmérséklete – és lényegében funkciója – miatt tökéletes sugárzónak tekinthető $\varepsilon_1 = 1$ A száraz gipszlap felülete a fehér papíréhoz hasonlítható, mikrobarázdált felülete befogja a sugarakat, így emissziós tényezője magas $\varepsilon_2 = 0,9$ [11].

Az izzó belseje foncsorozott, míg az izzószál fölött a foglalat akadályozza az infrahullámokat, ezért a sugárzás legnagyobb része lefelé irányul. Továbbá a burát elég közel elhelyezve a teljes besugárzott terület a gipsz felületére esik, így a sugárzási térszögarány közelíthető eggyel $\varphi_{12} = 1$. Végezetül, hogy a hőforrás felületét ki tudjuk számolni, a két hőmérsékletre van szükség. Maximális 150W-os teljesítménnyel az izzószál hőmérséklete már ismert, míg a gipszlapokét a beágyazott termoelemekkel regisztráltuk. A gipszlappal végzett mérések eredményei a 3.2 ábrán láthatók.



3.2. ábra: Száras gipszlap hőmérséklete az infrasugárzás alatt

A mérési eredmények alapján a szemmel láthatólag fényes fókuszpontban elhelyezhető termoelemen a hőmérséklet állandósult értéke 61°C , míg a fókuszon kívüli területen 52°C volt. Ezek átlagát véve $\bar{T}_2 = (61 + 52)/2 = 56,5^{\circ}\text{C} \approx 329\text{K}$ már minden információ adott, hogy kiszámíthassuk a sugárforrás felületét $P_{\text{vill}} \cdot 0,9 = Q_{\text{sug}} = \sigma \cdot A_{\text{forrás}} \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varphi_{12} \cdot (T_{\text{sug}}^4 - T_2^4)$ alapján.

$$A_{\text{forrás}} = \frac{P_{\text{vill}} \cdot 0,9}{\sigma \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varphi_{12} \cdot (T_{\text{sug}}^4 - T_2^4)} = \frac{150 \cdot 0,9}{5,6704 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (3100^4 - 329^4)} = 2,86 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

A körlappal közelített sugárforrás sugara:

$$r_{\text{forrás}} = \sqrt{A_{\text{forrás}} / \pi} = \sqrt{2,86 \cdot 10^{-5} / 3,14} = 3,01 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,01 \text{ mm}$$

Bár az így meghatározott sugárforrás méret nagyban függ a mérés pontosságától és a feltételezések helyességétől, a paradicsommal végzett mérések is ugyanilyen körülmények között zajlottak, így a szükséges izzomagasság számítása során ugyan-ezen feltételezéseket visszafelé is megtartottuk. Vagyis a vizsgálat paramétereinek beállítása egy referencia mérés alapján történt, így a mérések és konstansok pontatlanságai kiküszöbölhetőek.

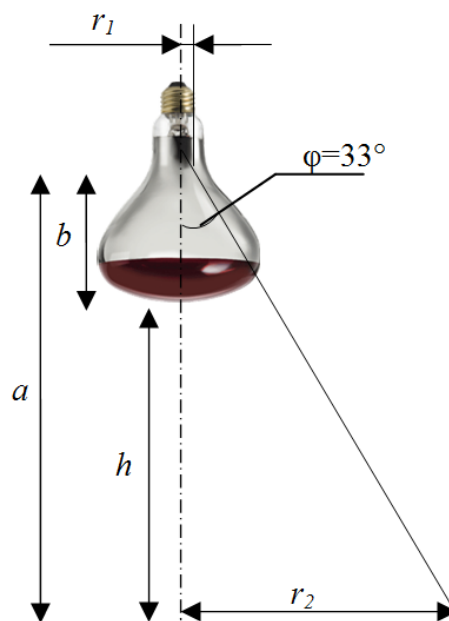
3.4.4. Paradicsom emissziós tényező meghatározása

Infrasugaras hőátadás megfelelő számításához nem csak a forrás, hanem a cél emissziós (sugárzás elnyelési) tényezőjét is ismerni kell. Irodalmi források hiányában mérést végeztünk a keresett érték meghatározáshoz.

Konvekciós szárítókamrában elhelyezett paradicsomszeleteket meghatározott hőmérsékletű és sebességű levegővel fűjtünk. A paradicsomon elhelyezett tapintó hőmérő (TM6801B digitaltermometer, mérési hiba= $\pm 1^\circ\text{C}$) segítségével folyamatosan mértük a felszíni hőmérsékletet. Emellett a kamra egy felső nyílásán, ahonnan szabad betekintés esett a paradicsomra pirométerrel (Votcraft IR900-30S, mérési hiba= $\pm 1^\circ\text{C}$) szintén mértük. Ezek után az infravörös hőmérő beállításai között addig változtattuk a mért anyag emissziós tényezőjét, míg a két eszköz azonos hőmérsékletet mutatott. A mérést a száradás különböző szakaszaiban, közelítőleg 5%-nyi nedvességtartalom csökkenésenként ismételtük. A mért értékek 0,9 és 0,65 között szórta, nem találtunk gyakorlati összefüggést a nedvességtartalom és ε között, ezért a továbbiakban az átlaggal számoltunk, azaz $\varepsilon_2 = 0,75$.

3.4.5. Sugárzási térszögarány meghatározása

Ha egy pontszerű sugárforrásból a hőenergia a pontot beburkoló gömb belső felületén minden irányban azonosan elnyelődik, akkor a geometriai kapcsolatot meghatározó térszögarány egy. Más, valós elrendezés esetén a forrás által kisugárzott energiának csak egy része érkezik célba, a többi más irányba távozik, tehát a térszögarány kisebb, mint egy. Ezt, a geometriától függő konstans több irodalmi forrásban is megtalálhatjuk különböző elrendezésekre [12]. A vizsgált rendszerben a sugárforrás körlappal közelíthető, míg a beérkezési felület – a fél paradicsom vágott felszíne - szintén körlap. Párhuzamos síkú, közös felületi normálisú egymás alatti középpontú kör alakú lemezek esetén a térszögarány számítható, a körök sugarától és azok távolságától függ.



3.3 ábra: Besugárzott terület geometriai arányai

A 3.3. ábra jelöléseinek megfelelően, ha r_1 a forrás sugara, r_2 a cél sugara és a a köztük lévő távolság akkor relatív sugarakat felhasználva:

$$R_1 = r_1 / a \quad R_2 = r_2 / a \quad X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right) \quad (3.4.2)$$

Továbbá az izzószál és a paradicsom közötti távolság: $a = h + b = h + 0,04$

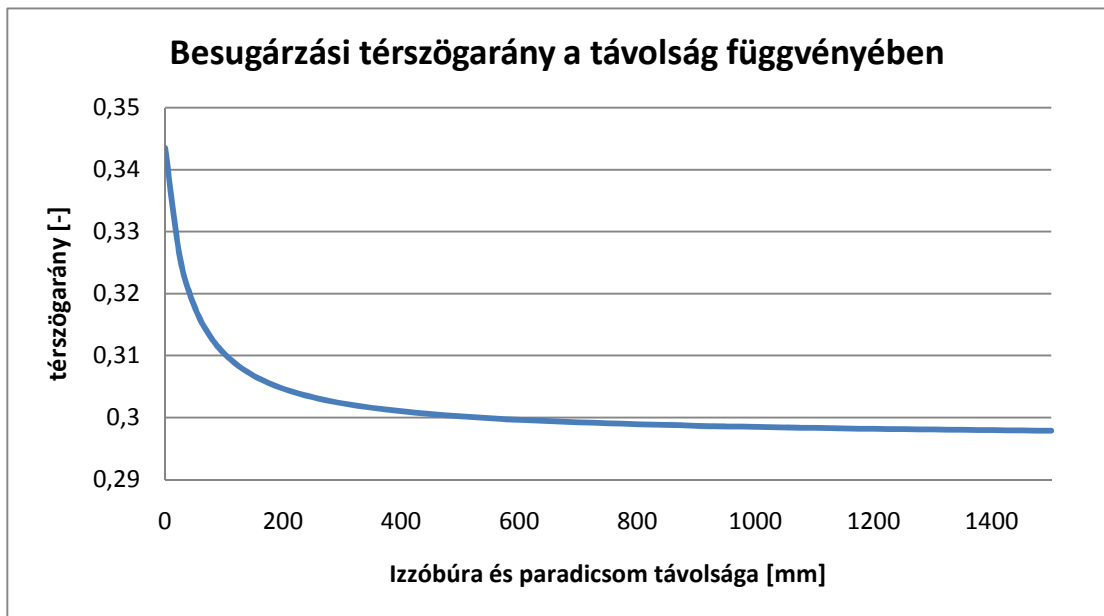
Valamint, hogy az izzó félkúpszöge 33° , így a bevilágított terület és ezzel r_2 is a h magasság függvénye:

$$r_2 = \frac{d}{2} + h \cdot \tan(33^\circ) = 0,0625 + 0,6371 \cdot h$$

Visszahelyettesítve adott sugárforrás méret mellett ($r_1 = 3,01 \cdot 10^{-3} m$) a térszögarány csak a paradicsom és izzó magasságának függvénye:

$$R_1 = \frac{0,00301}{h + 0,09} \quad R_2 = \frac{0,0625 + 0,6371 \cdot h}{h + 0,09} \quad X = 1 + \frac{1 + \left(\frac{0,0625 + 0,6371 \cdot h}{h + 0,09} \right)^2}{\left(\frac{0,00301}{h + 0,09} \right)^2}$$

A 3.4 diagramon ábrázolt függvényen látható, hogy 500 mm-es távolság után nincs jelentős változás a térszögarány értékében, végtelen távolság esetén 0,296875-höz tart.



3.4. ábra: Besugárzási térszögarány az izzó és a paradicsom közötti távolság függvényében

Ezek után már elegendő adatunk van ahhoz, hogy a bevilágított területre sugárzott hőenergia mennyiségét kiszámítsuk, feltételezve, hogy a szárítás során a cél hőmérséklete $60^\circ C$ -os (A gyakorlatban a 3000K-es izzószál hőmérséklet negyedik hatványa

három nagyságrenddel nagyobb, mint a másik hatványozott érték, így a paradicsom hőmérsékletét ki is hagyhatnánk a különbségből).

$$Q_{IR} = \sigma \cdot A_{forrás} \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varphi_{12} \cdot (T_{sug}^4 - T_2^4) \quad (3.4.3)$$

$$Q_{IR} = 5,6704 \cdot 10^{-8} \cdot 2,86 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot \varphi(h) \cdot (3100^4 - (60 + 273)^4)$$

Végül a bevilágított terület $A_{besugárzott}(h)$ és a paradicsom felület $A_{par_körlep}$ arányát felhasználva kiszámítható a szárítandó anyagba jutó hőenergia mennyisége.

$$Q_{IR_par} = \frac{A_{par_körlep}}{A_{besugárzott}} \cdot Q_{IR} \quad (3.4.4)$$

A mérési paraméterek kiszámítása során azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a paradicsom felülete nem csökken a szárítás során. A gyakorlatban ez nem igaz, mert a cél 10%-os nedvességtartalom mellett közel 40%-kal kisebb a felülete, azonban a kísérlet során állandó villamos teljesítmény és állandó izzó-paradicsom távolság mellett mértük a tömeget. Mivel cél volt, hogy a 60°C-os felületi hőmérsékletet ne lépjük túl, ezért a kezdeti (legnagyobb) paradicsom felület mellett besugározható maximális hőteljesítményhez tartozó izzómagasságot használtuk a folyamat során végig.

3.4.6. A paradicsom hőveszteségei IR szárítás közben

a) Levegő áramlás nélküli eset

Ha a paradicsom felett párában dúsuló levegő elszállítását csak a természetes áramlásra bízunk, akkor egyszerűen számítható a hőátadási tényező. Határolatlan nagy térben természetes áramlás melletti hőátadás, izotermikus gömb külső felületén az alábbi módon számítható [13]:

Jellemző méret a félgömbbel közelített paradicsom átmérője. Szükséges még a gömb felszínének hőmérséklete és a határrétegen kívüli (zavartalan) áramlás hőmérséklete. Mértékadó hőmérséklet az utóbbi kettő átlaga, amelyen vett Ra és Pr szám segítségével számítható a $Nu = \left[2 + \left(0,589 Ra^{1/6} / (1 + 0,653 / Pr^{9/16})^{4/9} \right) \right]$ szám, és végül így egy hőátadási tényező. A számítás lépései az sugárzó búrára a következők:

$$T_{paradicsom} = 60^\circ C$$

$$T_\infty = 22^\circ C$$

$$\bar{T} = \frac{T_{paradicsom} + T_\infty}{2} = \frac{60 + 22}{2} = 41^\circ C$$

Száraz levegő 41°C-on vett fizikai jellemzőit felhasználva:

$$\text{Hőfokvezetési tényező: } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} = \frac{27,49 \cdot 10^{-3}}{1,112 \cdot 1,008 \cdot 10^3} = 2,45 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\begin{aligned} \text{Rayleigh szám: } Ra &= \frac{g \cdot D_{paradicsom}^3 \cdot \beta \cdot (T_{paradicsom} - T_\infty)}{\nu \cdot a} = \\ &= \frac{9,81 \cdot 0,055^3 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot (60 - 22)}{16,92 \cdot 10^{-6} \cdot 2,45 \cdot 10^{-5}} = 4,78 \cdot 10^5 \end{aligned}$$

(Ezzel megfelel a formula érvényességi kritériumának: $Re < 10^{11}$)

$$\text{Nusselt szám: } Nu = 2 + \frac{0,589 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + 0,653 / Pr^{9/16}\right]^{4/9}} = 2 + \frac{0,589 \cdot (4,78 \cdot 10^5)^{1/6}}{\left[1 + 0,653 / 0,69^{9/16}\right]^{4/9}} = 6,00$$

$$\text{Hőátadási tényező: } \alpha_{hőveszt} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} = \frac{6 \cdot 27,49 \cdot 10^{-3}}{0,055} = 2,99 \frac{W}{m^2 K}$$

A paradicsom felülete egy félgömb és kör lap összeillesztésével közelítve:

$$A_{par} = \frac{4r^2\pi}{2} + \pi \cdot r^2 = \frac{4 \cdot 0,0275^2 \pi}{2} + \pi \cdot 0,0275^2 = 7,1 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (3.4.5)$$

$$Q_{paradicsom_veszt} = \alpha_{hőveszt} \cdot A_{par} \cdot (T_{par} - T_{\infty}) = 2,99 \cdot 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (60 - 22) = 0,81 W \quad (3.4.6)$$

b) Környezeti levegő áramoltatással

A paradicsom felületét környezeti hőmérsékletű levegővel fűjük, annak érdekében, hogy a párában dúsult levegő eláramoljon és az oda érkező kevésbé nedves levegő gyorsítsa a száradás folyamatát. Ekkor már nem természetes, hanem mesterséges, ún. kényszerített áramlásba helyezett testről beszélünk. A hőátadási tényező határolatlan nagy térben kényszerített áramlás melletti hőátadásra, izotermikus gömb külső felületén az alábbi módon számítható [13]:

Jellemző méret a gömmbel közelített paradicsom átmérője (D). Szükséges még a gömb felszínének hőmérséklete és a határrétegen kívüli (zavartalan) áramlás hőmérséklete és sebessége. Mértékadó hőmérsékleten vett Re és Pr szám segítségével számítható a $Nu = \left[2 + (0,4 Re^{1/2} + 0,06 Re^{2/3}) Pr^{0,4}\right] \cdot \phi_T$ szám, és végül egy hőátadási tényező. A szállítólevegő sebessége a konvekciós szárítás alapján átlagosnak választott 3 m/s a számítás során.

$$\bar{T} = \frac{T_{par} + T_{\infty}}{2} = \frac{60 + 22}{2} = 41^\circ C$$

Száraz levegő 41°C-on vett fizikai jellemzőit felhasználva:

$$\text{Korrekciós tényező: } \phi_T = (T_{\infty} / T_{par})^{0,25} = (333 / 299)^{0,25} \approx 0,99$$

$$\text{Reynolds szám: } Re = \frac{w \cdot D}{\nu} = \frac{3 \cdot 0,055}{16,92 \cdot 10^{-6}} = 9751$$

(Ezzel megfelel a formula érvényességi kritériumának: $3,5 < Re < 7,6 \cdot 10^4$)

$$\begin{aligned} \text{Nusselt szám: } Nu &= \left[2 + (0,4 Re^{1/2} + 0,06 Re^{2/3}) Pr^{0,4}\right] \cdot \phi_T \\ &= \left[2 + (0,4 \cdot 9751^{1/2} + 0,06 \cdot 9751^{2/3}) \cdot 0,69^{0,4}\right] \cdot 0,99 = 59,1 \end{aligned}$$

$$\text{Hőátadási tényező: } \alpha_{par} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} = \frac{56 \cdot 27,49 \cdot 10^{-3}}{0,055} = 29,6 \frac{W}{m^2 K}$$

Hővesztesség, ha a paradicsomot egy félgömb és kör összeillesztésével közelítem:

$$Q_{par_veszt} = \alpha_{par} \cdot A_{par} \cdot (T_{par} - T_{\infty}) = 29,6 \cdot 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (60 - 22) = 8,00 W \quad (3.4.7)$$

3.4.7. Infrsugárzással számított hőmennyiség

Már minden paraméter ismert, hogy a beadott és elvitt hőt kiszámíthassuk infravörös sugárzás esetén. A h magasságra beállított P_{vill} teljesítménnyel táplált izzó $A_{besugárzott}$ területre érkező sugárzásából a $A_{par_körlep}$ nedves felületű paradicsom Q_{IR} hőteljesítményt kap. Ebből bizonyos hányad a v levegősebességtől is függő veszteség, míg a másik része a szárításra fordítódik. Infrsugárzással a szárításra fordított hőenergia:

$$Q_{IR_szárítás} = Q_{IR_par} - Q_{hővesztés} = 0,9 \cdot P_{vill} \cdot \varphi(h) \cdot \frac{A_{par_körlep}}{A_{besugárzott}(h)} - Q_{hővesztés}(v) \quad (3.4.8)$$

A felületre fajlagosított bevitt energia:

$$q = \frac{Q_{IR_szárítás}}{A_{par}}$$

3.5. Tömeglefutás modellezése

A (3.2) fejezet (3.2.1) képlete alapján a tömeglefutás számítható, ha $MR(t) = a \cdot e^{-bt}$ ismert.

$$m(t) = m_{szárazanyag} \cdot X_0 \cdot a e^{-bt} + m_{szárazanyag}$$

A választott Handerson-Pabis (H-P) modellben az a paraméter az MR nedvességtartalom kezdő értéke, míg a b paraméter megadja, hogy az idő előrehaladtával mennyivel (milyen gyorsan) csökken a nedvesség. Az MR definíciójából és a megadott feltételezés alapján – mi szerint X_e az X_0 és X_i értékekhez képest jelentősen kisebb, így annak elhagyása nem okoz jelentős hibát - látható, hogy a $t = 0 = t_0$ időpillanatban $MR_i = X_i / X_0 \rightarrow MR_0 = X_0 / X_0 = 1$. Tehát a modell a paramétere adott.

Szárítás során a paradicsom felületéről távozó anyagáram sűrűség $N \left[\frac{kg}{m^2 s} \right]$ egyrészt arányos a párolgási tényezővel és a levegő valamint a nedves felület nedvességtartalmának különbségével. $N = \sigma \cdot (Y_{felületi} - Y_{gáz})$. Belátható, hogy a felületi nedvesség, mint anyagáram elpárologtatásához szükséges hőmennyiség növelésével egyre inkább gyorsul a párolgás $N = \frac{Q_{bevezetett}}{r_p \cdot A_{párolgó\ felület}}$.

A nedvességtartalom levegőbe párolgásának hajtóereje a szárítólevegő és szárítandó anyag közötti nedvességtartalom különbség, valamint a beadott hőteljesítmény. A félüzemi szárítóberendezésben közel állandó állapotú környezeti levegőt áramoltatunk át, tehát a szárítólevegő nedvességtartalma nem változik. A bevezetett hőmennyiség 3.2 fejezet (3.2.7) képlete alapján a hőátadási tényezőtől, a felülettől és a hőmérsékletkülönbségtől függ. A paradicsom felülete csökken száradás során, de ez a paraméter nem változtatható. A paradicsom hőmérséklete a korábban leírtak alapján nem haladhatja meg a 60 °C-t, a gáz hőmérséklet túlzott megemelése pedig óriási

költségeket von maga után, ezért mi a méréseink során a levegősebességet és ezzel a hőátadási tényezőt változtattuk.

Mindent összevetve tehát a tömegcsökkenést befolyásoló b faktor megváltozása a levegősebesség változásával arányos. A közöttük lévő kapcsolat meghatározható analitikusan Nu-Re összefüggés felhasználásával, melynek vázlatos lépései a következők (feltételezve az összes többi paraméter állandóságát a folyamat során):

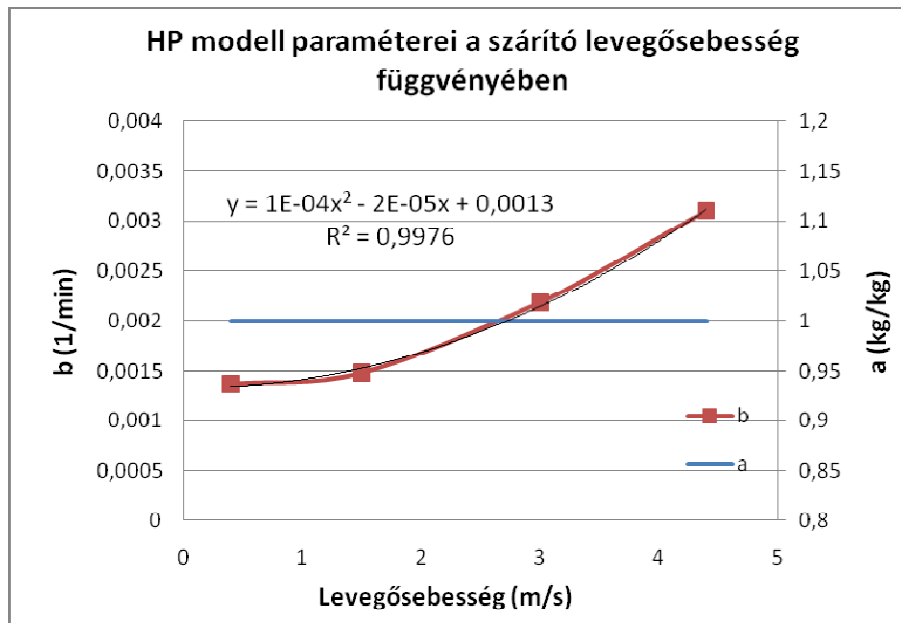
$$Re \sim v_{lev} \rightarrow Nu = f(Re) \text{ polinomiálisan} \rightarrow \alpha \sim Nu \rightarrow Q_{beadott} \sim \alpha \rightarrow dm/dt \sim Q_{beadott}$$

Mivel dm/dt tömegváltozás arányos $MR(t)$ változásával a b faktor arányos polinomiális formában a levegősebességgel. A HP modell segítségével az adott levegősebességek mellett mért tömeglefutásokra görbét illesztettünk, így a mérési pontokra számítható az a, b paraméter. Ezt felhasználva az összetartozó levegősebesség – a, b pontpárookra polinomot illesztettünk legkisebb négyzetek módszerével.

A mérési eredmények az alábbi táblázatban olvashatóak, míg az illesztett polinom a 3.5 ábrán.

v_{lev} (m/s)	a (kg/kg)	b (1/min)
4,4	1	0,0031
3	1	0,002187
1,5	1	0,00148
0,395	1	0,00137

A választott másodfokú összefüggés $R^2=0,9976$ hibaszint mellett visszaadja az összefüggést, tehát a mért $0,385m/s < v_{lev} < 4,4m/s$ tartományban bármely levegősebességre számítható a b paraméter. Ezzel a tömeg időbeli lefutása meghatározható és a 3.2 fejezet (3.2.6) képletében definiált C konstans ismeretében az energiaigény is számítható.



3.5. ábra: H-P modell két paramétere a szárítólevegő függvényében konvekciós szárítás esetén

3.6. Hőmennyiségek megoszlása

3.6.1. Beadott hőmennyiség

Szárítás során azt szeretnénk elérni, hogy a beadott hőmennyiség a paradicsom nedvességtartalmának elpárolgotatására fordítódjon a megadott körülmények ($T < 60^\circ\text{C}$, nem túl hirtelen szárítás) mellett. A pontos szabályozhatóság és modellezhetőség érdekében fontos azt tudnunk, hogy a bevezetett hő hogyan oszlik meg az egyszerre lejátszódó folyamatok (szárítás, melegítés, diffúzió) között.

Szárítás során a beadott hőmennyiség tehát három folyamat során hasznosul: a paradicsom felmelegszik, a nedvesség szabad felületre diffundál, és onnan elpárolog.

$$Q_{be} = Q_{melegítés} + Q_{diffúzió} + Q_{párolgás} \quad (3.6.1)$$

A beadott hőmennyiség konvekciós szárításkorán a korábban definiált (3.2.7) képlet szerint definiált. Mivel most időbeli lefutást is vizsgálunk, az összes időben változó jellemzőt ki kell fejezni t függvényében. A paradicsom és a gáz hőmérsékletét a mérés során adatgyűjtővel regisztráltuk, így $T_{paradicsom}(t), T_{gáz}(t)$ ismert. A hőátadási tényező lefutását a 3.2 fejezet taglalja. A paradicsom felületéről tudjuk, hogy félgömb alakú, és méréseink alapján a végső $X = 10\%$ nedvességtartalom elérésére közelítőleg 20-25%-al csökkent a vágott felület átmérője, míg a magassága (ami a kistengely fele) 50%-al lett kisebb. Ez természetesen arányos az elpárolgott víz mennyiségével, de a pontos átmérő, magasság, tömegváltozás kapcsolatát vizsgálni kellene még. Például egy kiválasztott konvekciós szárítási mérés során a paradicsom félbevágott felülete közel kör alakú volt, átmérője 55 mm, magassága 28 mm. A mérés végére átmérője 37 mm (67,3%), magassága 13 mm (46,4%). A mért tömegcsökkenésből számított nedvességtartalom alapján az $X=10\%$ -os értéket 646 perc után érte el. A köztes időpillanatokban a méretcsökkenést lineárisnak feltételezve számítható a három jellemző érték minden időpillanatban.

A nagytengely mérete (most $A=B$):

$$A_i = A_0 - A_0 \cdot \left(1 - \frac{A_{végső}}{A_0}\right) \cdot \frac{t_i}{t_{végső}} = 55 - 55 \left(1 - \frac{37}{55}\right) \cdot \frac{t_i[\text{min}]}{646} \quad (3.6.2)$$

A magasság (C) változása előbbihez hasonlóan:

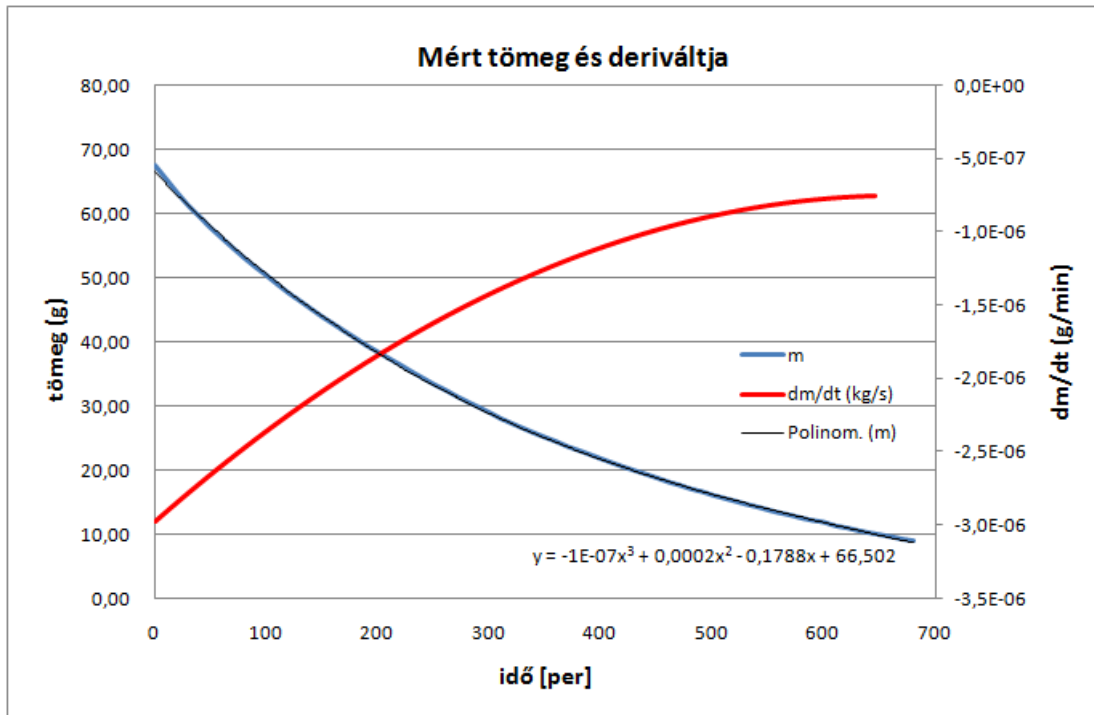
$$C_i = 28 - 28 \left(1 - \frac{13}{28}\right) \cdot \frac{t_i[\text{min}]}{646}$$

A paradicsom átlagos sűrűsége $\rho_p = 953 \text{ kg/m}^3$ adattáblázatban megtalálható, amelyet jelen vizsgálat során állandónak feltételezünk [14]. A 3.6.1 fejezetben leírtak szerint számított térfogatot sűrűséggel szorozva megkapjuk a paradicsom tömegét bármely pillanatra, amely közelítőleg megadja a mért tömegpontokra illesztett polinommal számolt értéket.

A három jellemző méret alapján számítható a félgömb felülete és térfogata, valamint a nagytengely, amely a Re szám jellemző mérete lesz.

3.6.2. Párolgásra fordítódó hőmennyiség

Az egyes időpillanatokban mért tömeg alapján kirajzolható a tömeg idő $m = f(t)$ kapcsolat. A görbét egy alkalmas polinommal közelítve analitikusan meghatározható a tömeg idő szerinti deriváltja, vagy az MR görbeillesztés alapján a, b paraméterek ismeretében (3.3.2) egyenlettel számítható is. Például a vizsgált mérésre a tömeglefutás és a számított derivált értéke látható a 3.6 ábrán látható.



3.6. ábra: 4,4 m/s-os levegősebességű konvekciós szárítás során mért tömegcsökkenés

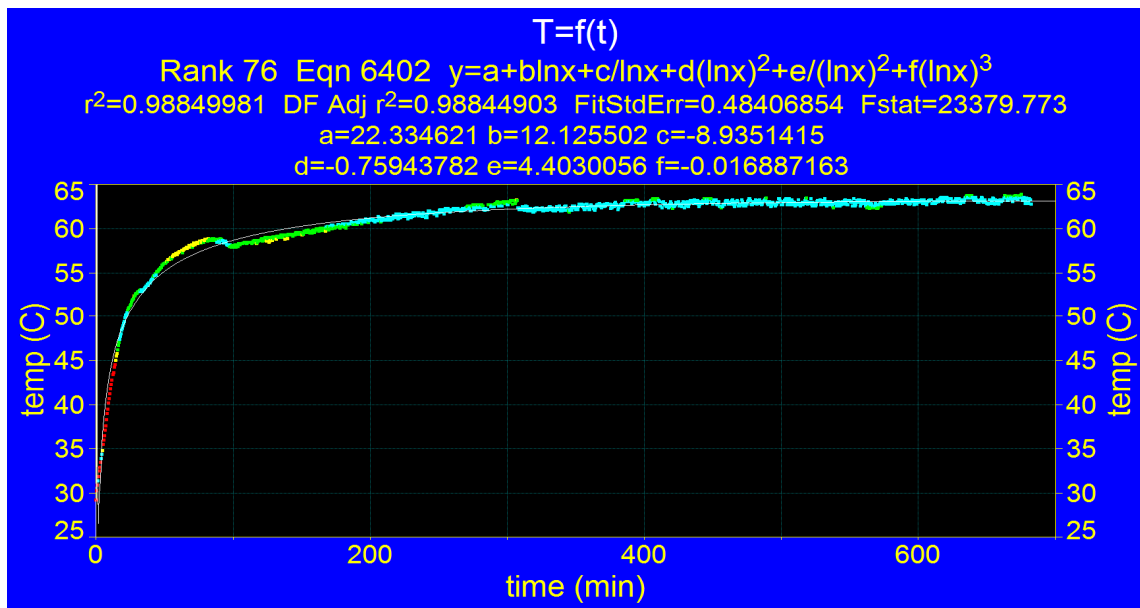
A tömegcsökkenés ismeretében a párolgáshő segítségével számítható a párolgáshoz szükséges energiaigény (3.2.3) alapján. A párolgáshő számításához a $r_p [kJ / kg] = 2502,2 [kJ / kg] - 2,4501 [kJ / (kg^{\circ}C)] \cdot t_p [^{\circ}C]$ összefüggést használtuk [14].

3.6.3. Melegedésre fordítódó hőmennyiség

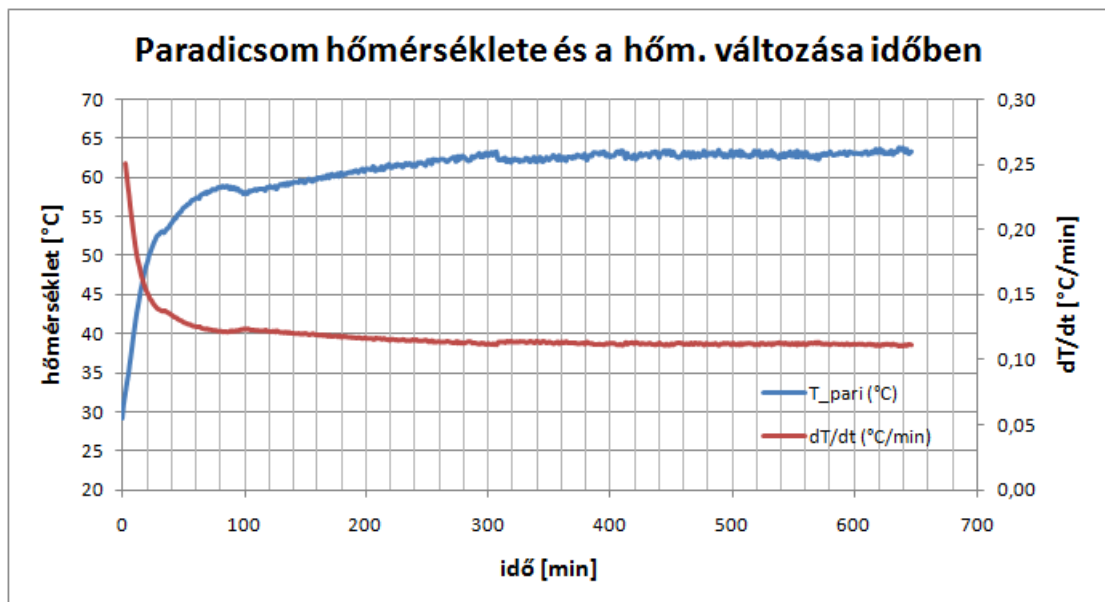
A paradicsomátlagos fajhője $c_{paradicsom} = 3,98 [kJ / (kgK)]$ adattáblázatban megtalálható [14]. A paradicsom tömegét bármely pillanatra megkapjuk a tömegpontokra illesztett polinom segítségével. A paradicsom hőmérsékletét adott időpillanatokban termoelemmel mértük, a mért adatokra TableCurve 2D [15] programmal analitikusan leírható görbét illesztettünk (3.7.ábra). A görbe paraméteres egyenletét ismerve már meghatározható a hőmérséklet idő szerinti deriváltja a példaként bemutatott esetre (3.8 ábra).

Ezek alapján a melegítéshez szükséges pillanatnyi hőteljesítmény, ha az idő szerinti derivált $[^{\circ}C/perc]$ -ben van megadva:

$$Q_{melegítés} = m_{paradicsom} \cdot c_{paradicsom} \cdot \frac{dT}{dt} \cdot \frac{1}{60} \quad (3.6.3)$$



3.7. ábra: 4,4 m/s levegősebességű konvekciós szárítás során a paradicsom hőmérséklete



3.8. ábra: A paradicsom hőmérséklete és a hőmérséklet idő szerinti deriváltja

3.6.4. Diffúzió hőigénye

A 3.6.1 egyenletből a diffúzió pillanatnyi hőteljesítmény igénye:

$$Q_{\text{diffúzió}} = Q_{\text{be}} - Q_{\text{melegítés}} - Q_{\text{párolgás}} \quad (3.6.4)$$

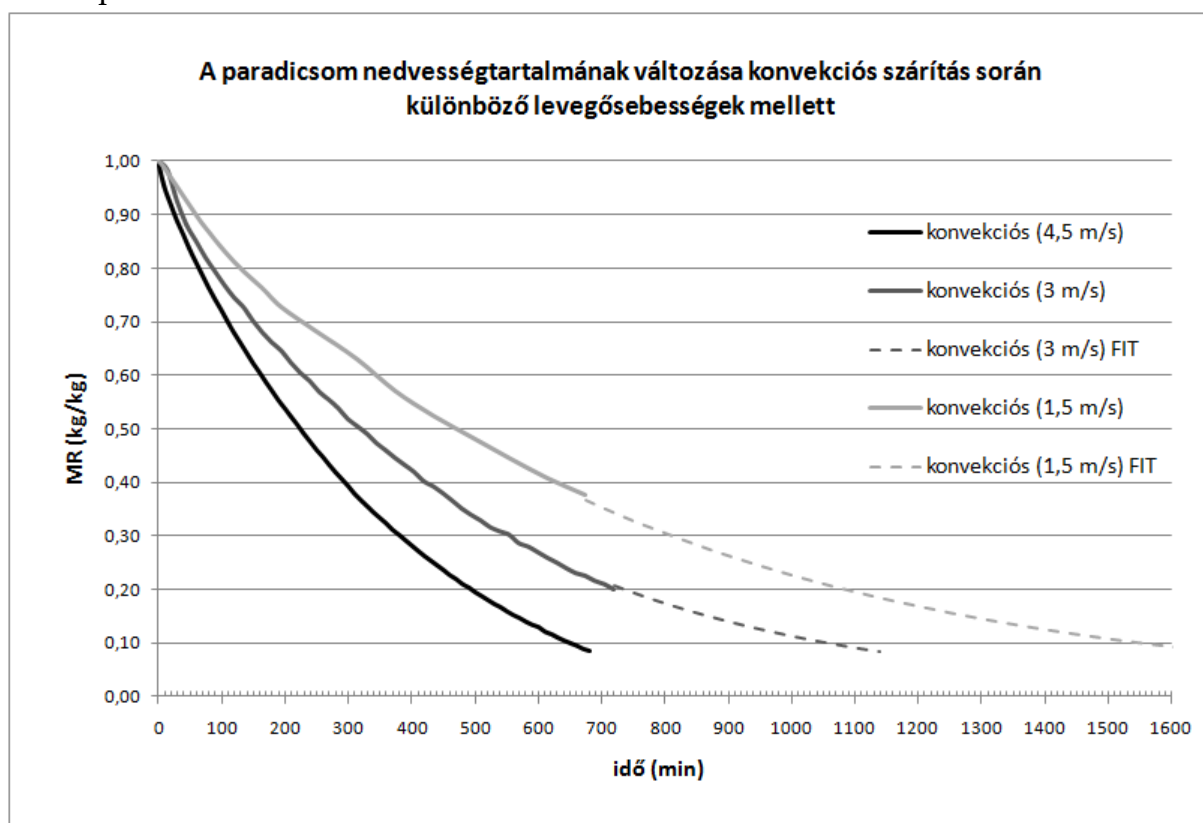
$$Q_{\text{diffúzió}} = \alpha \cdot A_{\text{paradicsom}} \cdot (T_G - T_P) - m_{\text{paradicsom}} \cdot c_{\text{paradicsom}} \cdot \frac{dT}{dt} \cdot \frac{1}{60} - \frac{dm(t)}{dt} \cdot r_P$$

4. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

4.1. Félüzemi konvekciós szárítás eredményei

A 2.3. táblázat állandó paramétereit mellett elvégzett félüzemi konvekciós szárítások eredményei a 4.1. ábrán láthatók.

A 4.1. ábra alapján elmondható, hogy a paradicsomok konvektív szárítása során nem a klasszikus száradási szakaszoknak megfelelően távozik a nedvesség a paradicsomokból. A száradás e szakaszok közül jellegre, leginkább a harmadik szakaszhoz hasonlítható, ahol a csökkenő száradási sebesség jellemző és ahol a nedvességtartalom exponenciálisan csökken.



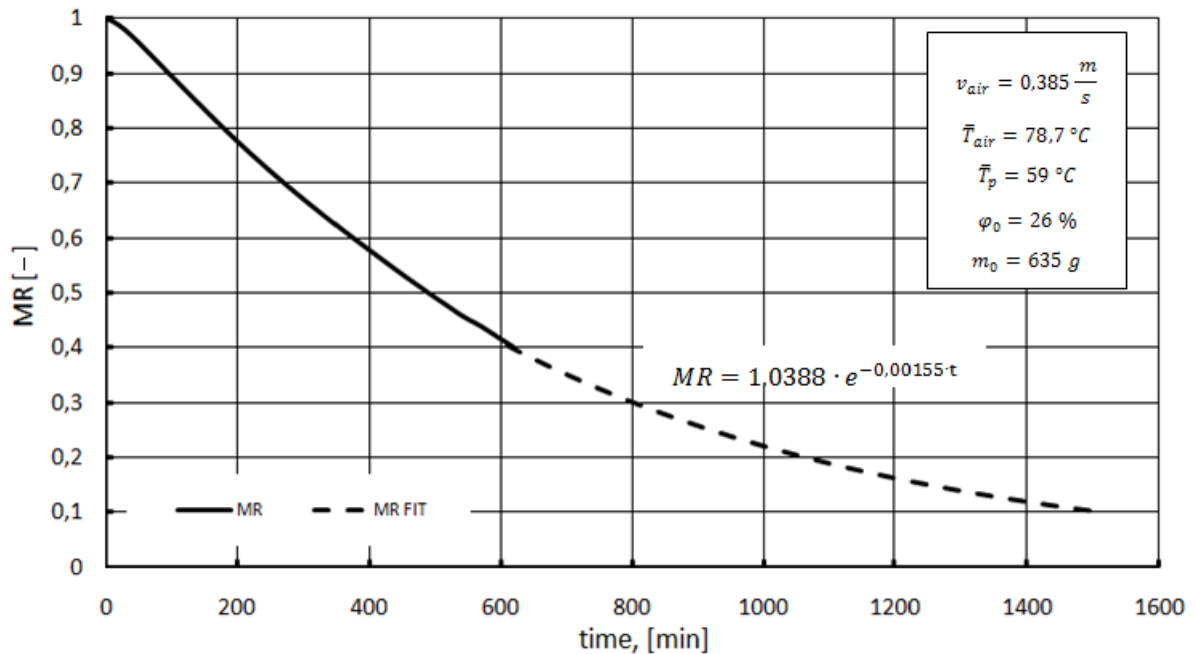
4.1. ábra Nedvességárány a száradási idő függvényében különböző szárítólevegő sebességek mellett extrapolálva ($T_G=62..76\text{ °C}$ és $T_P=53..61\text{ °C}$)

A 4.1. ábrán az extrapolációra azért volt szükség, mert az adott körülmények között véges ideig tudtuk a mérést futtatni az ÉPGET Tanszék által biztosított laboratóriumban. Látható, hogy mérés végére a paradicsom nem érte el kívánt 10%-os végső nedvességtartalmat, azonban az illesztett görbe extrapolációjával lehetőség van megbecsülni, a végső nedvességtartalom eléréséhez szükséges száradási időt. Paradicsomszárítás esetén a mérési adatokra számos modell szerinti görbe illeszthető. Esetünkben a mérési adatokra legjobban illeszkedő modell a Handerson-Pabis által leírt, amely a (3.1.2) összefüggés szerinti alakban írható fel [3]. Ez a modell jól illeszkedett a mérési pontokra ($R^2>0,98$), így az extrapolációból adódó szárítási idők jól tükrözik a

valóságot. Megfigyelhető, hogy a szárítólevegő sebességét növelve jelentősen csökkentek a száradási idők.

4.2. Laboratóriumi konvekciósszárítás eredményei

A mérést először a 4.1. rész szempontjai alapján értékeljük ki. Később az energiaigények alakulását mutatjuk be mérési és számított eredmények alapján.



4.2. ábra: Nedvességtartalom arányalakulása a szárítási idő függvényében laboratóriumi konvekciós szárításnál

A 4.2. ábrán látható száradási görbe vastag vonallal jelölt része a ténylegesen elvégzett szárítást mutatja. A teljes szárítást a kezdeti nedvességtartalom 10 százalékanak eléréséig végezve kapjuk meg a teljes száradási időt, amelyet a száradási görbe extrapolációjával határozhatunk meg. Jelen mérésnél azt várnánk, hogy a szárítási idő a nagyon alacsony szárítólevegő sebesség miatt az előző szárítási esetekhez képest (4.1. rész) nagyobb értékre adódik, ennek ellenére értéke az 1,5 m/s-os levegősebesség mellett végzett szárítás közelébe esik. Ennek oka, hogy ebben az esetben a szárítólevegő hőmérséklete magasabb volt, amely nagyobb hajtóerőt jelent a száradási folyamat során, így alacsonyabb szárítási időt eredményez.

A 3.3. fejezetben leírt matematikai modell számításának első lépéseként a 2.4. ábrán látható mérési elrendezés szerint elvégzett mérés eredményeiből az (3.3.1) összefüggést felhasználva kirajzoltuk az $P_2(t)$ mérési adatokat (4.3. ábra, fekete görbe). Ezután a (3.3.6) alapján számítottuk α_0 értékét, majd a (3.3.4, 3.3.5) alapján α_k értékét. Ezt követően (3.1.2) alapján a száradási görbe extrapolációjával (4.2. ábra) meghatároztuk az 1% nedvességtartalomhoz tartozó száradási idő (t_v) értékét. Az eddigi pa-

ramétereket és a számításukhoz szükséges további paramétereket a 4.1. táblázatban foglaltuk össze, a bemutatott példa esetén.

megnevezés	jel	érték	mértékegység
jellemző méret (paradicsom átmérő)	D	45	mm
mértékadó hőmérséklet (szárítólevegő, belépő)	T_G	78,9	°C
felszíni hőmérséklet (paradicsom)	T_p	59	°C
mértékadó sebesség (szárítólevegő)	v_{lev}	0,385	m/s
szárítólevegő sűrűség	ρ	0,99	kg/m ³
szárítólevegő hővezetési tényező	λ	0,029916	W/m ² *K
szárítólevegő dinamikai viszkozitás	μ	20,986	Pa*s
szárítólevegő izobár fajhő	c_p	1010,3	J/kg*K
Prandtl-szám	Pr	0,7084	1
Reynolds-szám	Re	817	1
kezdőpontbeli hőátadási tényező	α_0	82,97	W/m ² *K
konvektív hőátadási tényező (síklap)	$\alpha_{k,1}$	9,52..14,2 8	W/m ² *K
konvektív hőátadási tényező (félgömb)	$\alpha_{k,2}$	8,8..16,34	W/m ² *K
konvektív hőátadási tényező (teljes)	α_k	18,32..30, 62	W/m ² *K

4.1. táblázat: Paraméterek a hőátadási tényező meghatározásához

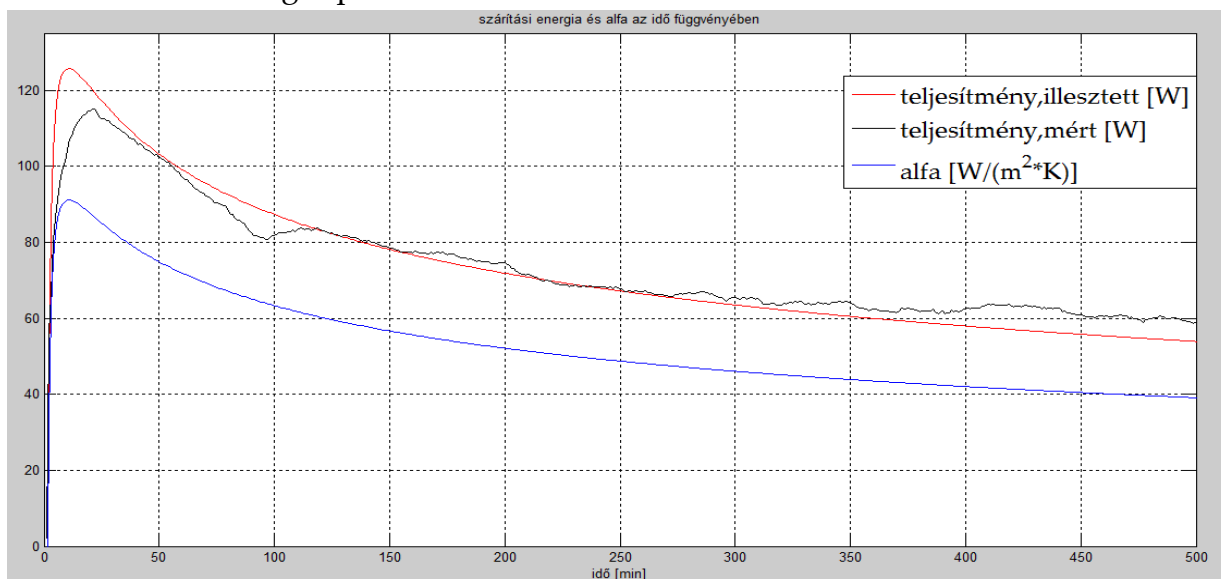
Következő lépésben a mért $P_2(t)$ adatsort korrigáltuk a hőveszteség értékeivel, majd MATLAB segítségével a (3.1.7, 3.3.3) felhasználásával görbét és meghatároztuk a (3.3.3) összefüggés A és B paramétereit. Az illesztett görbéről leolvastuk α_0 és α_k értékeit. A görbeillesztés eredményei a 4.3. ábrán láthatók, az így számított paraméterek értékei pedig a 4.2. táblázatban.

A hőveszteség két jelentősebb tagból tevődik össze. Egyrészt a két szigetetlen felületen (zárófedél és nézőüveg) keletkező hőveszteségből, másrészt a hengeres paláston a nem tökéletes szigetelés miatt keletkező hőveszteségből, ugyanis a szigetelés is, tapintásra érezhetően felmelegedett. A hőveszteség számítását természetes áramlást feltételezve végeztem el [13].

nézőüveg hővesztesége	$Q_{n\ddot{u}}$	7,25	W
zárófedél hővesztesége	Q_{zf}	4	W
hengeres palást hővesztesége	Q_{hp}	5,1	W
hőátadási tényező függvény paramétere	A	149,74	1
hőátadási tényező függvény paramétere	B	-56,833	1
kezdőpontbeli hőátadási tényező	$\alpha_{0,illesztet}$ t	91,12	W/m ² *K
konvektív hőátadási tényező (t=3000 [min])	$\alpha_{k,illesztet}$ t	20,85	W/m ² *K

4.2. táblázat A görbeillesztéssel meghatározott paraméterek

A nézőüvegre a hőveszteséget izotermikus, függőleges síklap lamináris áramlásban feltételezéssel, a záró fedélre pedig izotermikus, vízszintes síklap lamináris áramlásban feltételezéssel számítottam. A hengeres palástra a hőveszteséget izotermikus, vízszintes henger feltételezéssel számítottam. A kapott eredményeket és azok számításához szükséges paramétereket a 4.2 táblázat tartalmazza.



4.3. ábra: Matlab-ban illesztett hőteljesítmény és hőátadási tényező (a teljesítmények az P_2 értékeket fejezik ki)

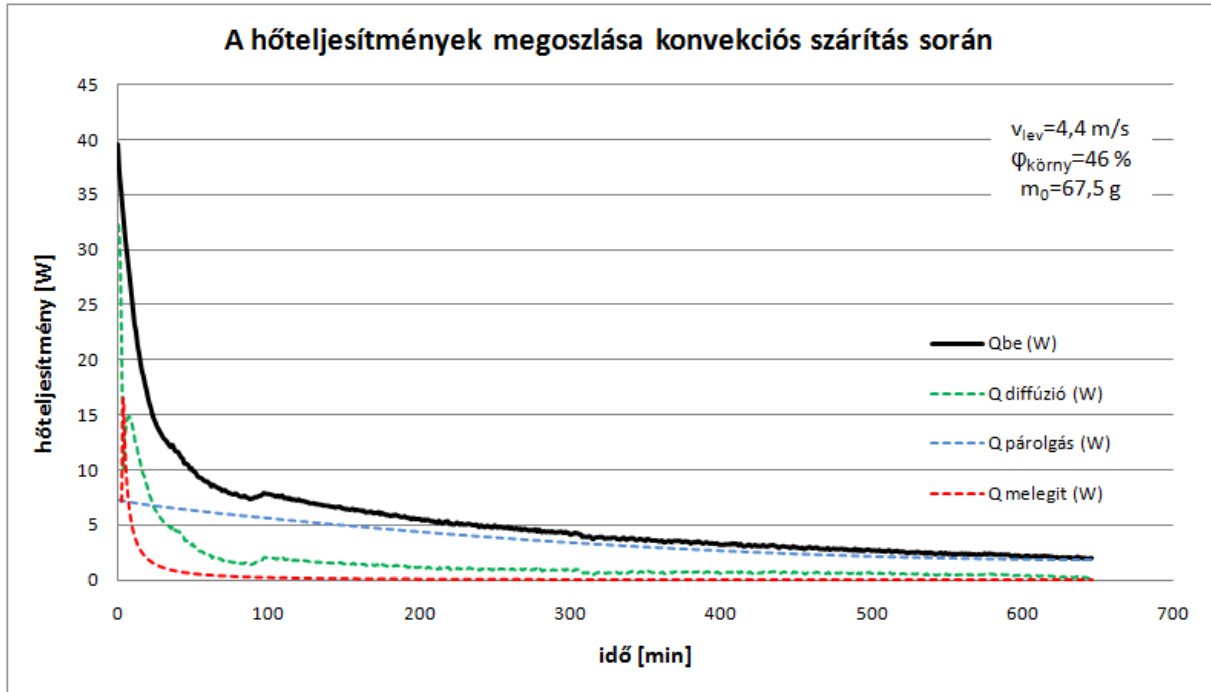
A 4.3. ábrán látható, hogy az illesztett függvény jó illeszkedik a mérési értékekre. Az 1 %-os relatív nedvességtartalom eléréséig extrapolált hőátadási tényező függvény pedig beleesik a számítással meghatározott α_k értéktartományába, ugyanakkor α_0 értékét kissé felülbecsüli. Ez a hiba véleményünk szerint abból származik, hogy a mérés megkezdésekor még nem állandósult a belépő szárítólevegő hőmérséklete, így alacsonyabb hőmérsékletről kezdődött a szárítás, amely a kezdeti szakaszban kevésbé intenzív elpárolgást okozott.

A fentiek során meghatározott α_0 és α_k aránya alkalmazható további olyan szárítási esetekre, amikor az áramlást jellemző Reynolds szám lamináris áramlást mutat. A két alfa aránya jelen esetben 4,37. Ennek ismeretében tetszőleges levegősebesség és hőmérséklet esetén meghatározható a szárítási teljesítmény, amelyből a szárítási idő ismeretében kiadódik a szárítás átlagos energiaigénye. A számítás első lépéseként a levegősebesség és hőmérséklet ismeretében számítjuk α_k értékét. Ezt felszorozva 4,37-tel megkapjuk α_0 értékét. A két értékre a száradási idő ismeretében illeszthető az $\alpha(t)$ függvény, amely alapján $P_2(t)$ számítható.

4.3. Hőteljesítmények megoszlása a konvekciós mérés során

A 4.4 ábrán látható a 3.6 fejezetben leírt modell segítségével egy kiválasztott konvekciós mérésre meghatározott hőteljesítmény megoszlás. Megfigyelhető, hogy a szárítás elején a melegítés hőigénye viszonylag magas, hiszen a környezeti hőmérsékletű paradicsom viszonylag gyorsan felmelegszik a szárítás közben jellemző közel

állandó hőmérsékletre. A párolgáshoz szükséges hőmennyiség közel lineárisan csökken, mivel a tömeg idő szerinti deriváltja alig csökken a folyamat során és a párolgás-hő is közel állandó. A diffúziós hőigény a bevezetett hőmennyiség és utóbbi kettő különbsége, ezért lefutását a modellben leginkább a hőátadással bevezetett energia határozza meg, amely a csökkenő felülettel és a 3.3 fejezetben leírt hőátadási tényező lefutással arányos.



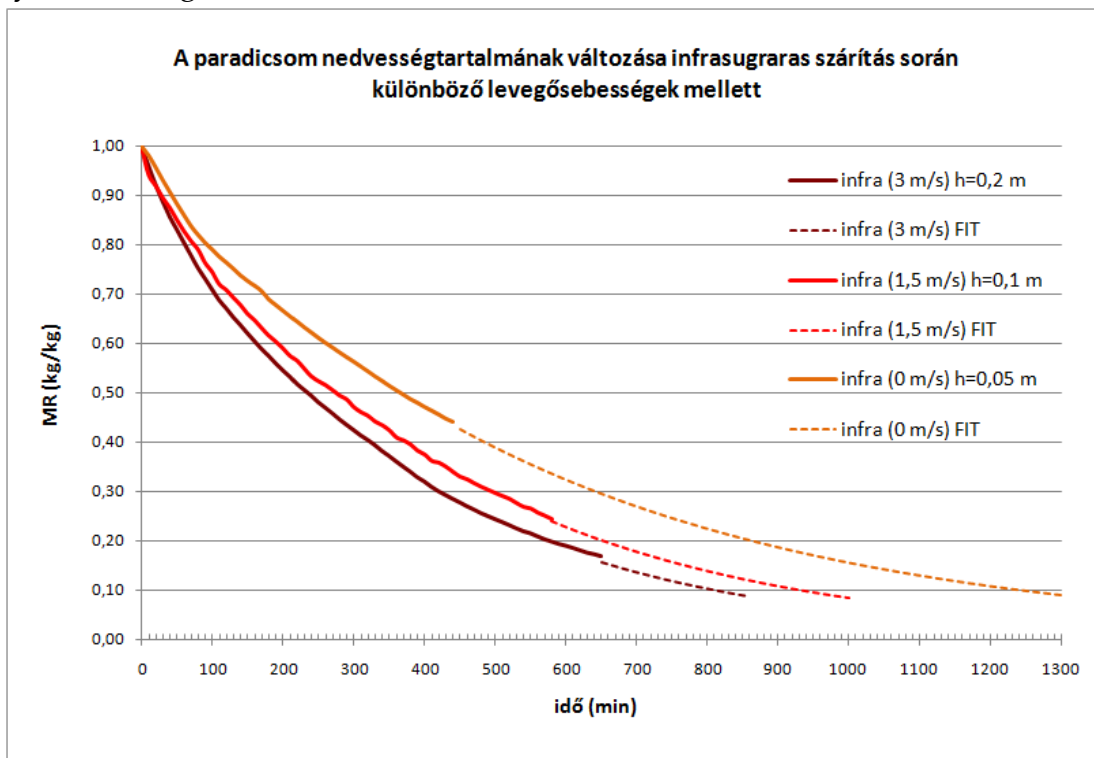
4.4. ábra: Hőteljesítmény megoszlás konvekciós szárítás során

4.4. Infrásugaras szárítás eredményei

Méréseink és modellalkotásunk célja, hogy az ipari méretű szárítási folyamatokat lehessen tervezni és vizsgálni. Mivel az infrásugaras hőbevezetés során csak a természetes levegőáramlás viszi el a paradicsom felett összegyűlő nedvesebb levegőréteget, ez valós méretben már problémát okozna, hiszen ott akár több száz kilogramm paradicsom száradna egyszerre sugárzók alatt és így a pangó nedves levegő lassítaná a folyamatot. Ezért mindenképpen valamilyen mesterséges levegőáramoltatásra van szükség az infrás szárítás során is.

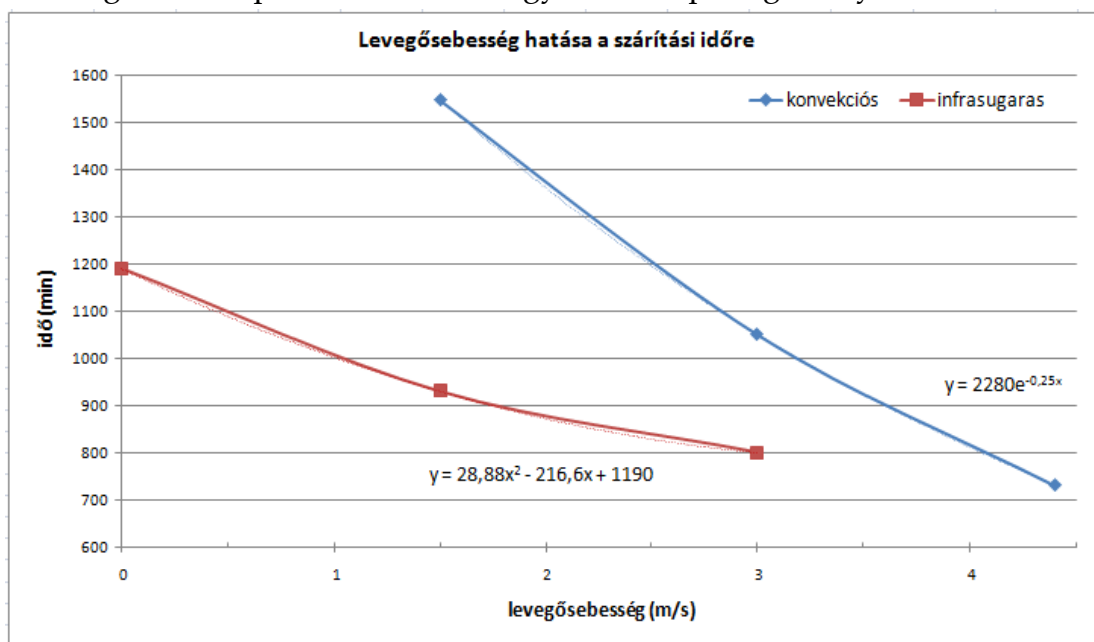
A konvekciós méréseink eredményeképpen meghatároztuk, hogy átlagosan 1 [W] hőteljesítmény igénye van egy fél paradicsomnak ahhoz, hogy a 10%-os nedvességtartalomig történő száradás közel másfél nap alatt végbemenjen. Ezek után kiszámoltuk, hogy bizonyos sebességű környezeti levegőt áramoltatva mekkora a paradicsom hővesztesége, majd ezzel korrigáltuk a szükséges bevezetendő hőteljesítményt. A 3.4 fejezetben leírtak alapján meghatározható, hogy adott magasságban elhelyezett adott teljesítményű izzó alatt a paradicsom mekkora hőteljesítményt kap. Így tehát összességében meghatározhatóak olyan mérési elrendezések, melyben a paradicsom szárí-

tására jutó hőmennyiség állandó, miközben eltérő sebességgel áramlik felettük a környezeti levegő.



4.5. ábra: Paradicsom infrasugaras szárítása különböző sebességű környezeti levegővel történő megfűtés mellett ($P_{\text{vill}}=150 \text{ W}$)

A 4.5. ábrán látható nedvességtartalom arány (MR) lefutását jelző görbék mutatják, hogy a diffúzióra és a melegedésre jutó állandó hőteljesítmény mellett a nagyobb sebességgel fűjt paradicsomok gyorsabban száradtak. Ezt vártuk, hiszen ekkor több száraz levegő kerül a paradicsomok fölé gyorsítva a párolgás folyamatát.



4.6 ábra: A levegősebesség hatása a 10% nedvesség eléréséhez szükséges szárítási időre

A felépített modellek és megvalósított mérések alapján kijelenthető, hogy a vizsgált tartományban, növekvő levegősebesség mellett a 10% nedvességtartalom eléréséhez szükséges szárítási idő konvekciós szárítás esetén exponenciálisan csökken, míg hővesztéssel korrigált infrasugaras szárítás esetén négyzetesen csökken a levegő sebességét növelve, ahogyan a 4.6 ábrán látható.

5. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A TDK dolgozat keretein belül megindokoltuk miért van szükség a folyamatok modellezésére. Irodalomkutatás alapján meghatároztuk, hogy a paradicsomok nedvességtartalom csökkenését leíró modellek közül a Handerson-Pabis modell használható a legkisebb hibával és az általunk vizsgált mérési elrendezésekre (konvekciós szárítás 0,38-4,4 m/s levegősebességgel, valamint infrasugaras szárítás 0-3 m/s sebességű környezeti levegő alkalmazásával) a definiált MR nedvesség arány időbeli lefutása analitikusan megadható $R^2 > 0,97$ szignifikancia szint mellett.

Méréssel igazoltuk, hogy az általunk szárított paradicsom kezdeti nedvességtartalma megegyezik az irodalmakban található $X=95\%$ nedves anyagra vonatkoztatott értékkel.

Kísérleti berendezést építettünk, melyben több paradicsom egyidejű szárítását vizsgálva három módon határoztuk meg a szárításhoz szükséges energiaigényt. A levegő állapotjelzők változásából a környezettől elvont hő, a termék tömegcsökkenéséből a párolgáshoz szükséges hő közelítése, míg az együttes hő és anyagátadáshoz tartozó hőátadási tényezővel a paradicsomba bevezetett hő számítható ki. Ezen három egyenletből felállított egyenletrendszer alapján a kialakított mérőberendezésben mért bármely kettő értékből meghatározható a harmadik értéke.

A konvekciós hőátadás kiszámításához definiáltuk az együttes hő és anyagátadáshoz tartozó hőátadási tényező időfüggését. Mérési eredményekből meghatároztuk a kezdeti, valamint analitikusan szárítás végére jellemző értékét.

A mért eredmények alapján meghatároztuk, hogy a kiválasztott H-P modell két paramétere hogyan függ a szárítólevegő sebességétől. Ezzel a 0,4-4,4 m/s-os levegősebesség tartományban modellezni tudjuk a szárítandó paradicsom időbeli tömegváltozását.

Egy mérésre diszkrét időpillanatokra meghatároztuk a felületcsökkenést, a hőátadási tényezőt. A mért levegőállapot és paradicsomtömeg segítségével számoltuk, hogy a folyamat során hogyan oszlik meg a beadott hőmennyiség a víz párologtatása, a paradicsom melegítése és a nedvesség diffúziója között. Ezzel kapcsolatot teremtettünk a ténylegesen beadott és a tömegcsökkenésből számított hőteljesítmény között. Ezt a faktort állandónak véve pontosan számítható a modellezett tömeglefutásból a pillanatnyi teljesítményigény is.

Mérőállomást alakítottunk ki az infrasugaras szárítás vizsgálatára. Az infrasugaras hőbeadás matematikai leírását felhasználva kiszámítottuk, hogy adott teljesítményű izzó által kisugárzott hőmennyiség hányad része jut a sugárforrástól adott távolságra lévő paradicsomba. Ezzel vizsgálni tudtuk, hogy állandó párolgásra fordítódó hőmennyiség beadásával (a fellépő hőveszteségek korrigálásával) mennyiben változtatja a tömegcsökkenés jellegét a paradicsom fölött áramló környezeti levegő. A mért adatok alapján összehasonlítható azonos sebességű környezeti levegővel fűjt infrasugaras és szárítólevegővel fűjt konvekciós száradási folyamat. Továbbá konvekciós szárítás esetén a bevezetett hőmennyiség átlagosan 5%-a paradicsom melegítésére, 68%-a vízpárologtatásra és 27% diffúziós folyamatokra fordítódik.

A jövőben szeretnénk a konvekciós méréseket pontosítani és szélesíteni a kialakított modell érvényességi tartományát és vizsgálni, hogy a szárítógáz hőmérsékletét hogyan lehet figyelembe venni a H-P modell két paraméterében.

A diffúziós folyamatok leírása és számítása a változó szerkezetű, inhomogén, időben változó alakú paradicsomra nehéz, de a jövőben vizsgálható lehetne, hogy a kialakított számítási eljárás ezen része mennyire valid.

Továbbá az infrasugaras mérések számának növelésével szintén lehetne a H-P modell paramétereinek és a beadott hőmennyiségnek kapcsolatát elemezni. Így a két szárítási eljárás egy modellben leírható, ezzel lehetőséget teremtve a szárítás energiaigényének minimalizálására.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Franceschi S. et al.: Tomatoes and risk of digestive tract cancers. *International Journal of Cancer*, no. 59, 181–184 (1994).
2. Charles Taiwo Akanbi et al.: Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*, vol. 73, 157-1263 (2006)
3. Ibrahim Doymaz: Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, no. 78, 1291-1297 (2007)
4. Engin Demiray et al.: Degradation kinetics of lycopene, β -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *LWT – Food Science and Technology*, no. 50, 172-176 (2013),
5. Ali Motevali et al.: Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management*, no. 52, 1192-1199 (2011)
6. Blake Ringeisen, Diane M. B., Pieter S.: Concentrated solar drying of tomatoes. *Energy for Sustainable Development*, (2014)
7. Kamil Sacilik et al.: Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, no. 73, 231-238 (2006)
8. Abano E. E. et al.: Influence of air temperature on the drying kinetics and quality of tomato slices, *Food Processing & Technology*, vol 2, no. 5 (2011)
9. Habib Kocabiyik et al.: The effects of middle infrared radiation intensity in the quality of dried tomato products. *International Journal of Food Science & Technology*, no. 49, 703-710, (2014)
10. Tunde-Akintunde T. Y.: Mathematical modelling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy*, no. 36, 2139-2145, (2011)
11. Mikron Vertetung Schweiz: Table of emissivity of various surfaces
http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf
12. John R. Howell: A catalog of radiation heat transfer configuration factors
<http://www.thermalradiation.net/indexCat.html>
13. Bihari P. et al.: *Gyakorlati feladatok gyűjteménye és sedéglet*. (2011)
14. ASHRAE: Handbook – Refrigeration: Thermal Properties of Food. (2006)
<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Termodinamica/Utility/Tabelle%20Alimenti.pdf>
15. Systat Software Inc.: Table Curve 2D: Automated curve fitting analysis (2014)
<http://www.sigmaplot.com/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>
16. M. Örvös, Gy. Schneider, Zs. Várkonyi: Energy consumption of tomato drying, *Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering* (2014)
17. Poós T. Szabó V.: Experimental method for evaluation the evaporation rate. *Proceedings of the 6th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources* (2014)

A hivatkozások között szereplő honlapokon a megjelölt tartalmak megtalálhatóak voltak 2014.10.20-án.

7. SUMMARY

Tomato is perishable in fresh form, therefore a conserving procedure is required. Such process can be convectional or infrared drying, when the moisture content of the tomato is evaporated, while the product keeps the nutrition values. To ensure this criterion and lessen the energy demand it is essential to set the proper process parameters. For these reasons we examined the effect of changing various drying parameters, and constructed a mathematical method to predict the mass change in time.

First we specified that Handerson-Pabis model can be used to calculate the temporal mass variation of tomatoes with the less error, for specific drying processes (convectional drying with 0,38-4,4 m/s air velocity, and infrared drying with 0-3 m/s ambient air velocity). It was also confirmed that the initial moisture content of tomato is $X=95\%$ relative to wet material according to literature.

We constructed equipment to examine the properties and energy consumption of convectional drying multiple halved tomatoes. A nonlinear equation system was established, in which energy demand can be calculated from physical condition change of drying air, from convectional heat transfer or can be approximated from mass change in time. We also determined the heat transfer coefficient for simultaneous heat- and mass transfer prevailing at the beginning of the drying.

Based on the measurement results we examined the connection between the parameters of H-P model and the drying air velocity, so that mass change in time can be accurately predicted in function of air speed within specific limits.

For one measurement tomato surface reduction and heat transfer coefficient were calculated to discrete moments, therefore using the registered temperature and mass values we could calculate how the heat inlet is shared between warming, diffusion and evaporation.

For infrared drying we used analytical correlations to calculate the amount of heat reaching the tomato from a specific IR bulb at given height. Using this relation we could analyze the effect of changing ambient air velocity above the tomato, while the growing heat loss was corrected with decreased heat source distance.

According to the measured and modeled results it can be said that the required drying time to reach an aim 10% moisture content, decreases exponentially for convectional and quadratically for IR drying with increasing air velocity. Also we found that for convectional drying an average 5% of the energy demand is used for tomato warming, 68% is for evaporation and 27% is for diffusional processes.

Keywords: *tomato, convective drying, infrared drying, energy consumption*