



**Nagy Rudolf**

## **TAKARMÁNYOK ÖNGYULLADÁSI PARAMÉTEREINEK STANDARTIZÁLT KÍSÉRLETI MEGHATÁROZÁSA**

### **Absztrakt**

A kukorica alapú takarmányok tárolása során bizonyos esetekben hőfejlődési folyamatokat figyelhetünk meg. Ezen termikus folyamat leírásának módszerei különféle, az anyag kémiai összetételét, az átalakulások szinteréül szolgáló anyagai halmazok fizikai megjelenési formáit tekintik kiinduló alapnak.

Az vizsgálat tárgyát képező anyagokban lezajló öngyulladás összetett jelenségének tanulmányozását lehetővé tevő vizsgálati módszerek biztosítják a jelenség egészére kiható paraméterek, illetőleg azok viszonyrendszerének meghatározását. A jelen írásban összegzett kutatás során a szerző közvetlenül kísérleti úton határozta meg a mintázott anyagok kritikus állapotához tartozó azon paramétereket, amelyek mellett az adott anyagi jellemzőkkel rendelkező halmazokban az öngyulladás folyamatok bekövetkezhetnek.

**Kulcsszavak:** öngyulladás, vizsgálat, kritikus hőmérséklet, termény, tárolás.

## **STANDARDIZED EXPERIMENTAL DETERMINATION OF AUTO- IGNITION PARAMETERS OF FEEDS**

### **Abstract**

During the storage of corn-based feeds, heat generation processes can be observed in some cases. The methods of describing this thermal process consider various chemical compositions of the material, the physical manifestations of the material sets that serve as the sinter of transformations, as a starting point.



The test methods enabling the study of the complex phenomenon of auto-ignition that can take place in the investigated materials ensure the determination of the parameters affecting the whole phenomenon, as well as their relationship. In the course of the research summarized in the present paper, the author directly experimentally determined the parameters belonging to the critical state of the patterned materials, at which auto-ignition processes can occur in the populations with the given material characteristics.

**Keywords:** self-ignition, test, critical temperature, crop, storage.

## 1. BEVEZETÉS

A mezőgazdaságban megtermelt növények közül az olyan szálatakarmányok, mint például széna, lucerna, stb. önmelegedésre hajlamosak. Önmelegedés a nedves bálázott vagy kazalba rakott halmokban fordulhat elő. A betakarított szálás takarmányokból keletkező hő a folyamat korai szakaszaiban a baktériumok, penészgombák és mikroorganizmusok élettevékenységéből származóan szabadul fel. A káros hőtermelődési folyamat csak a megfelelő mértékben ki nem szárított takarmány esetében jöhet létre, melyhez azonban 15 – 20 %-os nedvességtartalommal kell rendelkeznie. Az így bekövetkező önmelegedési folyamatnak öngyulladásba történő átváltásához sok egyéb feltétel mellett rossz szellőzésnek és megfelelő aprítottságnak is párosulnia kell. Az ennek nyomán megfigyelhető hőakkumulálódási folyamat egészen a takarmány meggyulladásáig tart. [1]

A jelen kutatást illetően azonban lényeges tisztázni, hogy a biológiai rendszerekben lazajló öngyulladás jelenségek lényeges eltérést mutatnak a tisztán fizikai, fizikai-kémiai, illetőleg kémiai folyamatok által determináltakétól. Amennyiben az öngyulladás szilárd anyagok halmaiban következik be, úgy annak alapfeltétele, hogy, a halom belsejében lezajló hőtermelő folyamat felülmúlja a hőveszteség sebességét és az ennek nyomán fellépő hőakkumuláció révén az anyag gyulladási hőmérsékletére hevüljön. [2]

A fentihez hasonló sok tényező felhasználásával leírható öngyulladás jelenség léphet föl különböző szemes termények, olajos magvak, nedves fűrészpor tárolása esetén is. Nem meglepő tehát, hogy az eredményes tűzvédelmi intézkedések megalapozásához olyan

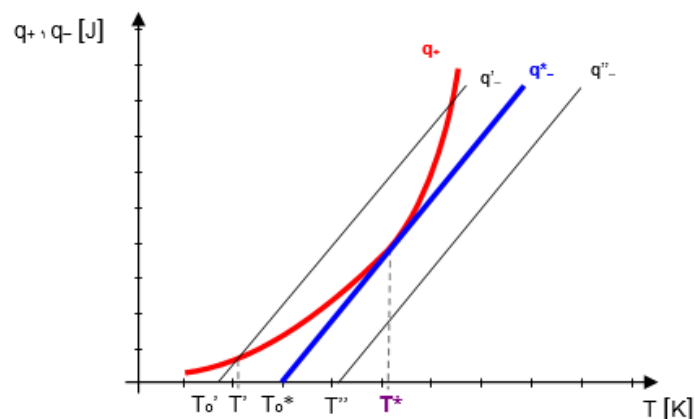


laboratóriumi vizsgálatok egész sorozatát kell elvégezni, melyek ezen összetett folyamatok termodinamikáját megfelelő részletességgel képesek feltérképezni. [1]

## 2. VIZSGÁLATI MÓDSZER ALAPJAI

Amint az előző részben tárgyaltuk, az öngyulladás folyamatát rendkívül nehéz kvantitatív módon leírni, még egyszerű kísérleti konfigurációk mellett is. Ezért az öngyulladásához vezető paraméterek meghatározásában, a legtöbb módszertan a stabil égés termikus egyensúlyára vezető hőtermelési és hőveszteségi folyamatok leírására szolgáló elmélet szélsőséges határesetét alapul vevő kritikus állapotból vezeti le a szilárd anyagok öngyulladásra való hajlamának leírását. [3]

Amint azt az 1. számú ábrán kiemelt grafikonok egymáshoz viszonyított helyzetéből is kiolvashatjuk.



1. ábra: Szemjonov-modell ábrázolása<sup>1</sup>

### 2.1. Öngyulladás vizsgálata indirekt módszerrel

Az ezen csoportba sorolt módszerekkel vizsgálható rendszerek megfelelően nagy Biot-szám mellett képesek biztosítani az önmelegedés feltételeit. Azaz a környezet felé leadott hő mindenkor alatta marad a termelődő hőnek. Mindazonáltal a hő koncentrálódása a jellemzően

<sup>1</sup> Forrás: Himicheskaya Enciklopedia [4]



a rendszer belsejében mutatkozó hőforrás közvetlen környezetében még nem jelenti automatikusan azt, hogy a rendszerben öngyulladás is bekövetkezik. Ennek eldöntéséhez vissza kell kanyarodnunk az alap definíció szerinti feltétel vizsgálatához és meg kell tudnunk válaszolni a kérdést, hogy mely körülmények esetén haladja meg minden időpillanatban a hőtermelés sebessége a hővesztés sebességét. A megoldáshoz vizsgálatainkban választanunk kell egy stabil kiindulópontot, amely támpontul szolgálhat az alapvetésnek megfelelő változók értékeinek megtalálásában. Ez a rendszerállapot nem más mint a termikus egyensúlyi helyzet és ehhez tartozó a kritikus munkapont, amelyhez rendelt kritikus környezeti hőmérsékletet meghaladva teljesülnek az öngyulladás feltételei. Következésképpen a vizsgált paraméterekkel jellemzett állapotban a hőtermelés sebességét a kritikus állapothoz tartozó ugyanezen mutató nagyságával összevetve megállapítható a rendszer öngyulladási potenciálja.

Az egyszerű mennyiségi viszonyítás alapjául a Frank-Kamenyckij paraméter szolgál, amely egy dimenzió nélküli (a továbbiakban a  $\delta$ -jelölést alkalmazva) érték, és közvetlenül alkalmas a rendszer öngyulladási hajlamának eldöntésére. Matematikailag kifejezve akkor hajlamos a rendszer öngyulladásra, ha a kiszámított paraméter nagyobb a kritikus értéknél, azaz  $\delta > \delta_{kr}$ .

A módszer alkalmazásakor a következő kikötésekkel élünk:

- A hő egy egyszerű reakcióban termelődik, amelynek sebessége időben állandó, a hőmérsékletfüggését pedig az Arrhenius egyenlet írja le.
- A rendszer kiinduláskor környezeti hőmérsékleten van.
- A rendszer belsejében a hő vezetéssel transzportálódik.
- A rendszer felületén a hő sugárzással és konvekcióval adódik át a környezetnek, továbbá a rendszer felülete környezeti hőmérsékleten van (nagy Biot-szám).
- Az anyag izotrop és homogén a jellemző fizikai paraméterekre nézve, amelyek hőmérsékletfüggésétől eltekintünk.

Az elmélet kiindulási egyenlete, az instacionárius hővezetés körében jól ismert forrásos,

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\dot{Q}'''}{k} = \frac{\partial T}{a \cdot \partial \tau} \quad (3.)$$

egydimenziós alak):

ahol:  $\dot{Q}'''$  – térfogategységben időegység alatt termelt hő [ $J \times m^{-3} \times s^{-1}$ ],

$k$  – hővezetési tényező [ $J \times m^{-1} \times s^{-1} \times K^{-1}$ ],



a – hőfokvezetési tényező [ $\text{m}^2 / \text{s}$ ],

Az egyenlet átalakítható a következő módon:

- feltételezve, hogy a melegedési folyamat a rendszer egy pontjában indul, majd az ott termelt hő gömbszimmetrikusan terjed vezetéssel a rendszer belsejében (x helyett  $r$  helykoordinátákat alkalmazunk),
- áttérünk stacionárius esetre ( $\partial T / \partial \tau = 0$ ),

Bevezetjük a dimenziómentes hőmérsékletet, amelynek definiáló egyenlete:

ahol:  $\Theta$  – dimenziómentes hőmérsékletet,

$$\Theta = \frac{E}{R \cdot T_R^2} \cdot (T - T_R) \quad (4.)$$

E – aktiválási energia [ $\text{J}/\text{mól}$ ]

T – a minta belsejének hőmérséklete [ $\text{K}$ ],

$T_R$  – referencia hőmérséklet (általában egyenlő a környezeti hőmérséklettel) [ $\text{K}$ ],

R – egyetemes gázállandó [ $\text{J} \times \text{mól}^{-1} \times \text{K}^{-1}$ ],

A Frank-Kamenyckij paraméter és a hóforrásban képződő hóáram közötti összefüggést az előzőek alkalmazásával az alábbi képlet fejezi ki:

$$\dot{Q}''' = \delta \cdot e^{\Theta} \quad (5.)$$

ahol:  $\delta$  – Frank-Kamenyckij paraméter, dimenzió nélküli szám,

Alkalmazva a feltételeket és elvégezve a behelyettesítéseket az egyenlet rendezésével megkapjuk a Frank-Kamenyckij paraméter definiáló egyenletét:

$$\delta = \frac{E \cdot \rho \cdot \Delta H_r \cdot r^2}{R \cdot k \cdot T_R^2} \cdot A \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_r}} \quad (6.)$$

ahol:  $\delta$  – Frank-Kamenyckij paraméter, dimenzió nélküli szám,

E – aktiválási energia [ $\text{J}/\text{mól}$ ],

$\rho$  – anyag sűrűsége [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\Delta H_r$  – termelődő reakcióhő [ $\text{J} \times \text{kg}^{-1} \times \text{s}^{-1}$ ],

r – minta mérete [ $\text{m}$ ],

A – preexponenciális tényező, dimenzió nélküli szám,



$R$  – egyetemes gázállandó [ $J \times \text{mól}^{-1} \times K^{-1}$ ],

$k$  – hővezetési tényező [ $J \times \text{m}^{-1} \times K^{-1}$ ],

$T_R$  – környezeti hőmérséklet [K],

A néhány ismeretlen paramétert tartalmazó egyenlet megoldására használt indirekt módszer lényege, hogy a Frank-Kamenyckij paraméter számításához szükséges mennyiségeket a kritikus viselkedési körülményeket produkáló eredményekből vezetjük le. Ezekhez viszont szabályozott környezeti körülmények beállításával végzett mérések sorozatán keresztül juthatunk el. A kritikus viselkedés keresése közben a mintaméretet ( $r$ ), és a környezeti hőmérsékletet ( $T_R$ ) lehet változtatni. Így egy bizonyos kritikus méretet definiálhatunk a kritikus hőmérsékleten a minta méret változtatásával, vagy a kritikus hőmérsékletet határozzuk meg egy bizonyos minta méretre úgy, hogy a minta állandó geometriája mellett a környezeti hőmérsékletet addig növeljük a mérésorozat soronkövetkező tagjában, míg öngyulladást nem tapasztalunk.

Az ezen körülmények között regisztrált paraméterekkel függvényt generálva a leolvasott függvényértékekből már  $\delta$  számítható. Ehhez a Frank-Kamenyckij paraméter a definiáló

$$\ln \frac{\delta \cdot T_R^2}{r^2} = P - \frac{E}{R \cdot T_R} \quad (7.)$$

egyenletét (6.) átírva, egyes tagjait tömörítő új jelöléseket bevezetve és átrendezve a következő formulát kapjuk:

$$P = \ln \frac{E}{R} \cdot \rho \cdot \frac{\Delta H_r \cdot A}{k} \quad (8.)$$

ahol:  $\delta$  – Frank-Kamenyckij paraméter, dimenzió nélküli szám,

$T_R$  – környezeti hőmérséklet [K],

$r$  – minta mérete [m],

$P$  – természetes alapú logaritmus hatványkitevője,

$E$  – aktiválási energia [J/mól],

$R$  – egyetemes gázállandó [ $J \times \text{mól}^{-1} \times K^{-1}$ ],

Mivel  $T_R$  és  $r$  értékei a beállított vizsgálati körülmények részeként ismertek a kritikus esetre, akkor  $\delta_{kr}$  megfelelő értéke egyenletbe helyettesíthető. Mivel az egyenlet  $1/T_R$ -t nézve egy





monoton csökkenő egyenes egyenletét mutatja, a függvény ábrázolásával E/R-t az egyenes meredeksége, míg P-t az egyenes és az Y tengely metszéspontja által kijelölt érték adja.

A kapott értékeket visszahelyettesítve az alapegyenletünkbe a Frank-Kamenyckij paraméter számítható bármely más felvett  $T_R$  és  $r$  értékekhez rendelve [2].

## 2. LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOK ELŐKÉSZÍTÉSE

Az öngyulladás folyamatok vizsgálat anyagok esetében nem mindegy, hogy milyen tűzkockázattal számolhatunk a gyakorlatban egyik vagy másik kukorica alapú takarmány öngyulladása következtében. Az itt bemutatott vizsgálokhoz kukorica alapú takarmányokból különböző feldolgozási eljárásokkal előállított termékek szolgáltatták a mintázandó anyagokat.

### 3.1. Mintázott anyagok

Ezeknek a takarmányoknak közös jellemzőjük, hogy fajtánként eltérő mennyiségben ugyan, de főként szénhidrátokat, fehérjéket és növényi olajokat tartalmaznak. A kisebb mennyiségben bennük fellelhető vegyületek közül az öngyulladás folyamatokra gyakorolt hatásuk révén fontosnak ítélték az igen komoly biológiai aktivitással rendelkező enzimek. Az ehelyütt történő megemlítésük azért is lényeges, mivel a kukorica alapú takarmányok öngyulladásának mechanizmusában kiemelt helyzetet foglalnak el azok a folyamatok, melynek során az öngyulladást előidéző képes hő képződik.

#### 3.1.2. Vizsgálati minták

*Alacsony fehérjetartalmú CGF:*



A műanyagzsákos kiszerelésű alacsony fehérjetartalmú dara halványsárga színű, szagtalan látható szennyezésektől mentes termék. Szemcsemérete a finomliszt részecskéinek tartományába sorolható. Konzisztenciája szemmel láthatólag nedvesség függő. Laza szerkezetű, tárgyak felszínén jól megtapadó és könnyen tömörödő (2. kép).



3. kép: Alacsony fehérjetartalmú CGF<sup>2</sup>

### *Magas fehérjetartalmú CGF:*

Az eltérő fehérjetartalom az dara színében csekély színárnyalat változást eredményezett, de alapvetően halványsárga színét (3. kép) megőrizte az anyag. A szennyezésmentes. Szemcsemérete az előzőével azonos, könnyen porzó. Állaga púderszerű és kevésbé

---

<sup>2</sup> Készült a szerző saját felvételeinek felhasználásával.





higroszkópos. A minta kimérését követően kialakuló térfogata tömörítéssel jelentős mértékben befolyásolható.



**3. kép:** Magas fehérjetartalmú CGF<sup>3</sup>

*Durva CGF-dara:*

Ez az dara szagtalan, enyhén narancsos árnyalatú. Kevert szemcsézettségű, morzsalékos állagú, jól adagolható. Vegyes szerkezetének (4. kép) apróbb alkotóelemei részben megtapadnak a nagyobb szemcsék felszínén.



**4. kép:** Durva CGF-dara<sup>4</sup>

*Kukoricacsíra:*

---

<sup>3</sup> Készült a szerző saját felvételeinek felhasználásával.

<sup>4</sup> Készült a szerző saját felvételeinek felhasználásával.



Halványsárgás színű, szennyezés mentes, szagtalan termék. Viaszos tapintású, kemény kültakaró borítja (5. kép). Durva szemcsézettség, de egységes szemcseméret jellemzi. Könnyen pergő szemei felhalmozásakor a levegő számára jól átjárható hézagok alakulnak ki a halmazokban.



5. kép: Kukoricacsíra<sup>5</sup>

## 3.2. Laboratóriumi berendezés

### 3.2.1. Környezeti hőmérséklet szabályozása

A kísérleti berendezés központi eleme egy német gyártmányú Heraeus T 5042 típusú 250 °C névleges hőmérsékletű, természetes légáramlású berendezés (7. kép) volt. A szárítószekrény hőszigetelt belső tere 27 × 35 × 42 cm<sup>3</sup> térfogatú. A belmagassága felső körülbelüli 1/5 részének magasságában rozsdamentes acélrácszat szolgált a mintatároló kockák felfüggesztésére. A hőmérséklet szabályozására szolgáló potenciométer fokoztása 2 °C-os. A belső hőmérséklet hőtehetetlenség okozta 1,9 °C-os tartományon belüli kilengésekkel kísért alakulásának nyomon követésére egy beépített 300 °C-ig kalibrált folyadékos hőmérő szolgál.

---

<sup>5</sup> Készült a szerző saját felvételeinek felhasználásával.



**7. kép:** Heraeus 5042 T típusú kemence<sup>6</sup>

### 3.2.2. Minták elhelyezése

A minták befogadására szolgáló szabályos kocka geometriával rendelkező mintatárolók acélhálóból készültek, amelynek szemmérete 0,05 mm. A tetejükön felül nyitott kosarak élhossza rendre 5 cm, 10 cm és 15 cm volt. A kemencében történő felfüggesztésükhöz 0,2 mm-es vörösrézhuzalból készült pántokat használtam. A pántokat a kockák két-két átellenes éleinek felsőrészén lévő szemeken átfűzött ugyancsak vörösréz füleken keresztül duplán átvezetve rögzítettem. Végül a kosarak tartópántjait „S” alakú akasztón átvetve függesztettem fel a mintákat a kemencében lévő rozsdamentes rácsozatra.

### 3.2.3. Hőmérsékletmérés, adatgyűjtés

A szárítószekrény belsejében az elrendezést úgy igyekeztem kialakítani, hogy a mintatartó kockák képzeletbeli átlói által kijelölt közepük minél inkább egybeessen a kemence belsejének geometriai középpontjával, de a léghőmérséklet mérésre szolgáló termoelem és a kemence fala között egyenlő hely maradjon. A kemencén belüli hőmérsékletek mérésének helyeit három ponton jelöltem ki. A termikus változások mérésére használt  $-200,0$  és  $+1370,0$  °C-os méréstartományú, NiCr–Ni termoelemeket – a vizsgált közeg hőmérsékletének alakulására nézve – meghatározó értékeket szolgáltató pontokban pozicionáltam. Így a minta belsejének

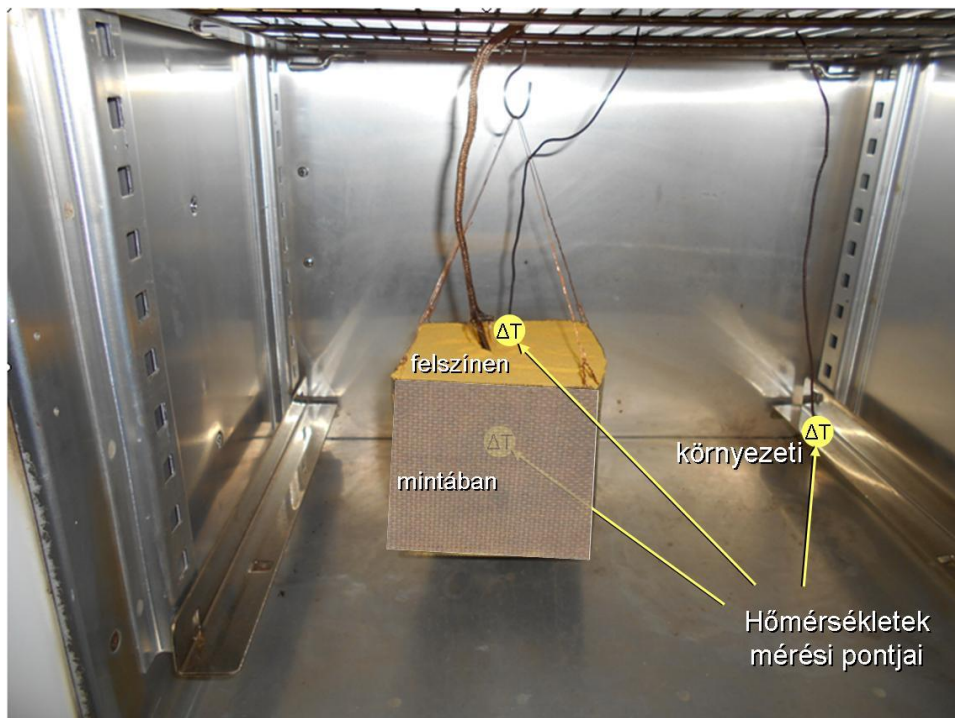
---

<sup>6</sup> Forrás: [5]





hőmérsékletét a kockák geometriailag kijelölt középpontjában mértem. Ugyanakkor a kocka felső nyitott síkjában elhelyezkedő felszíni réteggel éppen csak érintkezésbe hozott másik termoelemmel mértem a felszín hőmérsékletét. A környezet hőmérsékleti viszonyait mérő termoelem helyzetét úgy jelöltem ki, hogy az kb. a felfüggesztett minta középpontját tekintve azonos magasságban és a belső légtér képzeletbeli másik függőleges harmadoló síkja, valamint a hosszanti felezősík által kimetszett pontra essen (8. kép).



**8. kép:** Vizsgálati elrendezés a szárítószekrény belső terében<sup>7</sup>

A hőmérsékleti adatokat az említett három ponton egyidőben mértem. A mért adatokat az ALMEMO 2690-8 típusú adatgyűjtő eszközzel (9. kép) rögzítettem. Az eszközhöz a jelek az előre programozott csatornák valamelyikén keresztül jutottak el, melyekhez a csatlakozókkal egybeépített termoelemek a kemence tetején lálálható és tűzoltó takaróból származó szövettel kibélelt nyíláson át kivezetve kapcsolódódtak. Az adatgyűjtő egység LCD kijelzőjén megjelenő

<sup>7</sup> Készült a szerző saját felvételeinek felhasználásával.



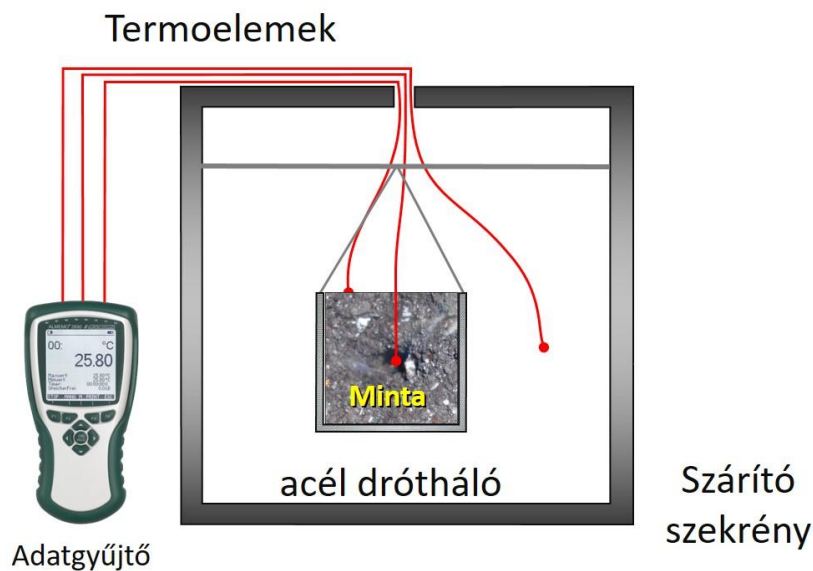
hőmérsékleti értékek a mért közeg egy 15 másodperces ciklusidő alatt kialakuló hőmérsékletének felelnek meg.



9. kép: Adatgyűjtő eszköz<sup>8</sup>

### 3.3. Vizsgálati módszer

A már ismertetett szabványosított módszerek közül a vázlat szerinti (6 ábra) összeállításban alkalmazott eszközökkel határoztam meg a minták kritikus öngyulladás hőmérsékletét.



6. ábra: Vizsgálati berendezés vázlata<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Forrás: [6]

<sup>9</sup> Szerkesztette a szerző

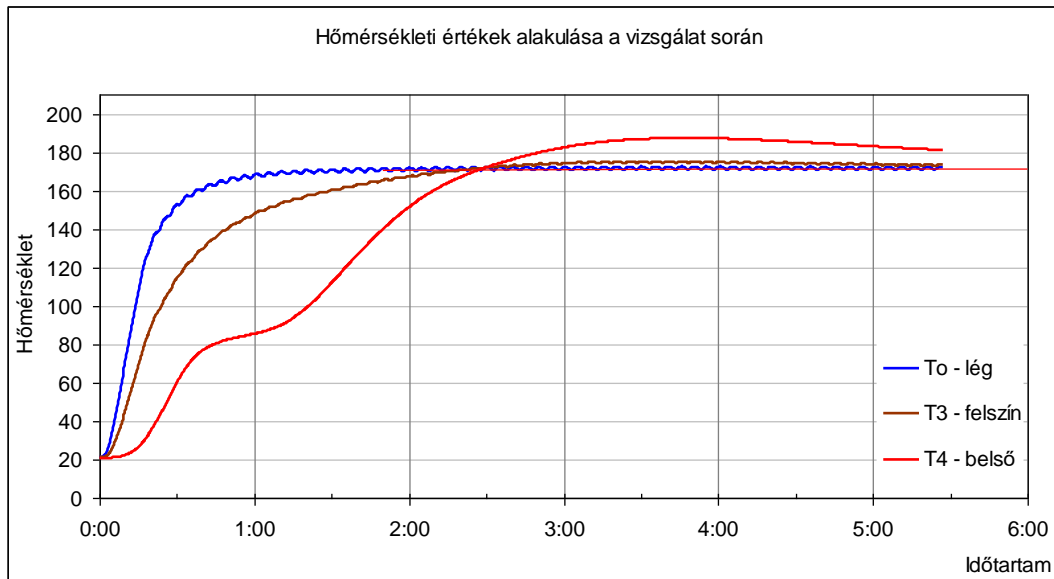


Az alkalmazott modell segítségével a tárolási méret és az öngyulladás hőmérséklet viszonyát lehet megállapítani. Ezután extrapolálással lehet a kritikus hőmérsékleti értékeket más tárolási geometriákra vonatkoztatni. Ennek lépései magukban foglalják a minta adott térfogatához rendelt kritikus hőmérsékletének meghatározását egy folyamatosan közelítő méréssorozattal. Itt a nemzetközileg is általánosan elfogadott megengedett maximális hőmérséklet emelkedés értékét 40 °C-ban tűztem ki határállapotnak. Kerestem tehát az úgynevezett maximális szubkritikus és a minimális szuperkritikus állapotokat. Definíciószerűleg ezek az elnevezések a következőket takarják:

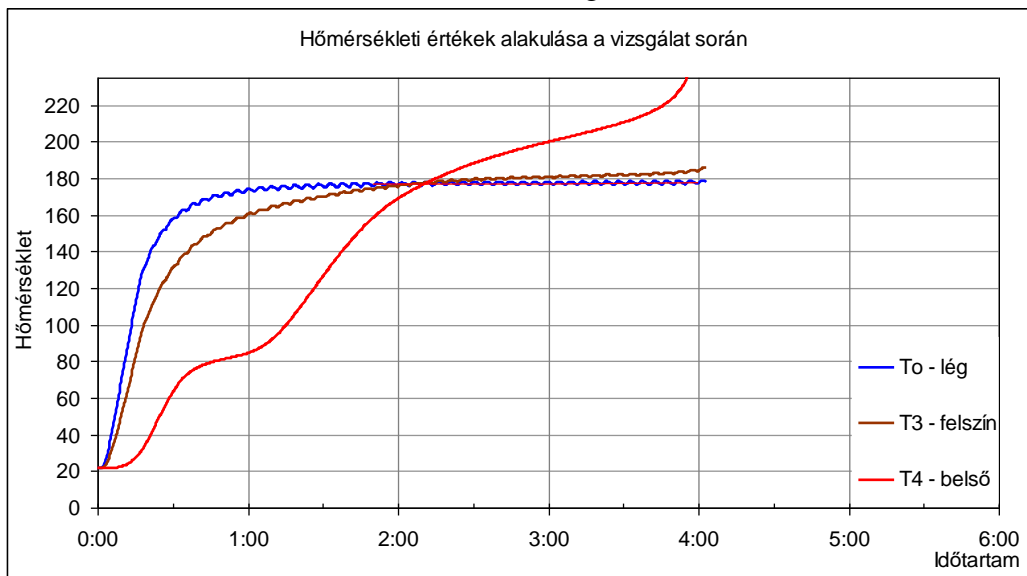
- Szubkritikus ( $T_{\text{sub}}$ ) a vizsgált minta környezetének azon hőmérséklete, amelynél a minta hőmérséklete a szárítószekrény hőmérsékletét meghaladja, de a hőmérsékletemelkedés nem éri el a 40 °C-t a környezeti hőmérséklet értékéhez viszonyítva;
- Szuperkritikus ( $T_{\text{sup}}$ ) az a környezeti hőmérséklet érték, amelynél a mintahőmérséklet a szárítószekrény hőmérsékletét legalább 40 °C-kal meghaladja.

Tipikus szubkritikus, illetőleg szuperkritikus görbemenetek (7. és 8. ábra) sajátosságairól szólva elmondható, hogy az első esetben a minta hőmérséklete (legfelső vonal) meghaladja a környezetét, de az anyag a hőveszteségek miatt visszahűl, ugyanakkor a másik szuperkritikus állapotba került anyagban a görbe a környezeti hőmérséklet fölötti tartományban dinamikus emelkedésbe kezd.





7. ábra: szubkritikus görbemenet<sup>10</sup>



8. ábra: szuperkritikus görbemenet<sup>11</sup>

A gyakorlatban ez azt jelentette, hogy az előre beállított különböző maximális kemence hőmérsékletekre történő melegítés közben mindaddig végeztem a mintával önmelegedési vizsgálatokat, míg meg nem találtam azt a hőmérsékletet, amelynél a minta belső

$$T_{kr} = \frac{T_{sub} + T_{szup}}{2} \quad (9.)$$

<sup>10</sup> Szerkesztette a szerző

<sup>11</sup> Szerkesztette a szerző



hőmérsékletének emelkedése éppen nem nőtt a környezeti hőmérséklet fölé 40 °C-kal, illetve éppen ezen túllendülve a 40 °C-ot meghaladó melegedésbe nem ment át az anyag. A két alulról és felülről határoló hőmérsékleti értékből egyszerű számtani középértéket vonva kijelöltem az adott térfogathoz tartozó kritikus öngyulladás hőmérsékletet ( $T_{kr}$ ). [7]

Majd mindezt az eljárást ugyanazon anyagra a másik két eltérő méretű mintatartó kockával is elvégeztem. Az így kapott a kritikus hőmérsékleti értékeket felhasználva a kritikus paraméter meghatározására szolgáló (7.) egyenletet linearizáltam, és ábrázoltam. Az egyenesek segítségével a 1. számú táblázatban szereplő, adott mintaalkozhoz tartozóan meghatározható, a mintamennyiséghez és környezeti hőmérsékletéhez tartozó kritikus Frank-Kamenyckij paramétert ( $\delta$ ). A kiértékelésben az elmélet szerinti alapvetésekre építve vizsgálandó a tesztek alapján meghatározott kritikus paraméter ( $\delta_{kr}$ ) és a vizsgálatban alkalmazott kocka geometriájához tartozó kritikus érték viszonya. Megjegyzendő, hogy a számításokban az 1. számú táblázatban szerepeltetett  $2 \times r$  értékek estében az élfelező „r” értéket vesszük figyelembe [2]. Ez abból az elméleti alapok sorában lefektetett feltételezésből ered, hogy az anyag izotróp és benne a hő gömbszimmetrikus vezetéssel terjed. Az adott geometriába befoglalható maximális térfogatú gömb szimmetriája miatt annak sugara éppen az élhossz felének méretét adja. A kritikus paramétert így kiszámítva legfeljebb csak önmelegedést tapasztalunk, ha fennáll, hogy  $\delta < \delta_{kr}$ , illetve meg is gyullad az anyag, ha a reláció megfordul  $\delta > \delta_{kr}$ .

Ssz.	Geometria	Méreték	Kritikus paraméter ( $\delta_0$ )	$\Theta_0$
1.	henger	sugár: $2 \times r$ magasság: $2 \times l$	$2 + 0,841 \frac{r^2}{l^2}$	
2.	végtelen hosszú henger	sugár: $r$	2,0	1,39
3.	gömb	sugár: $r$	3,32	1,61
4.	végtelen sík-réteg	vastagság: $2 \times r$	0,878	1,12
5.	derékszögű hasáb	élek: $2 \times r$ , $2 \times l$ , $2 \times m$	$0,873 \left( 1 + \frac{r^2}{l^2} + \frac{r^2}{m^2} \right)$	



		$r < l, m$		
6.	<b>kocka</b>	él: $2 \times r$	<b>2,52</b>	<b>1,89</b>

### 1. számú táblázat:

Kritikus paraméterek és a geometriai jellemzők összefüggései<sup>12</sup>

### 3.4. Elvégzett vizsgálatok

Az induló hőmérsékletek megfelelő kiválasztását célzó vizsgálatok kezdeti szakaszában már megmutatkoztak a hosszan tartó mérési időtartamok okoztak időveszteségek.

A későbbiekben az előzetesen behatárolt légtérhőmérsékletet környezeti paraméterként kinduló alapként véve, rendre méréssorozatok elvégzésével megállapításra kerültek valamennyi takarmány mintáiban a szabványos eljárás szerinti térfogatokhoz rendelhető szuperkritikus hőmérsékletek. A mérési adatok ezt követő kiértékelésével nyert és a vizsgálat szempontjából releváns adatokból kiderült, hogy a vizsgálati minták kisebb a hibahatáron belülinek értékelhető eltérésekkel az elméletileg várható értékek körüli szabályosnak tekinthető mérési eredményeket produkáltak, így lehetővé vált a vizsgálati eredmények meghatározása és kiértékelése.

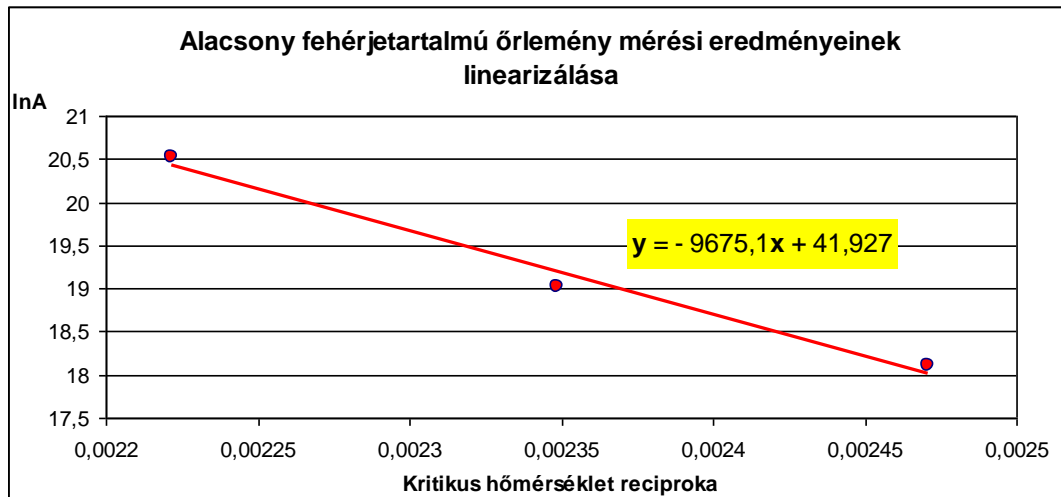
## 4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

A vizsgálatok szolgáltatotta mérési adatokat felhasználva a minták belső hőmérséklet-emelkedéséből az adott méretbeli jellemzőkhöz rendelve a bemutatott módszerrel számított értékeket a kiértékelést segítő táblázatba foglaltam. Majd az indirekt megoldáshoz alkalmazott módszer szerint linearizáltam a mérési eredményeket. A kapott egyenes egyenletében szereplő együtthatók, a Frank-Kamenyeckij paramétert definiáló eredeti egyenletének (6.) megoldásában kerültek felhasználásra. [1]

<sup>12</sup> Forrás: [8]



## 4.1. Eredmények



### 4.1.1. Alacsony fehérjetartalmú CGF adatsorai

Minta élhossza [cm]	Élfelező		Hőmérséklet			Abszolút kritikus hőmérséklet			$\ln \frac{\delta_{kr} \cdot T_{kr}^2}{r^2}$ (lnA)
	r [m]	r <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	t <sub>szub</sub> [°C]	t <sub>szup</sub> [°C]	t <sub>kr</sub> [°C]	T <sub>kr</sub> [K]	1/T <sub>kr</sub> [K <sup>-1</sup> ]	(T <sub>kr</sub> ) <sup>2</sup> [K <sup>2</sup> ]	
5	0,025	0,000625	176,5	177,5	177	450,15	0,002221	202635,0225	20,521179
10	0,05	0,0025	151,7	153,5	152,6	425,75	0,002349	181263,0625	19,023428
15	0,075	0,005625	130,6	132,5	131,6	404,7	0,002471	163782,09	18,1110853

9. ábra: Alacsony fehérjetartalmú CGF mérési eredményeinek linearizálása

$$y = - 9675,1x + 41,927 \quad (11.)$$

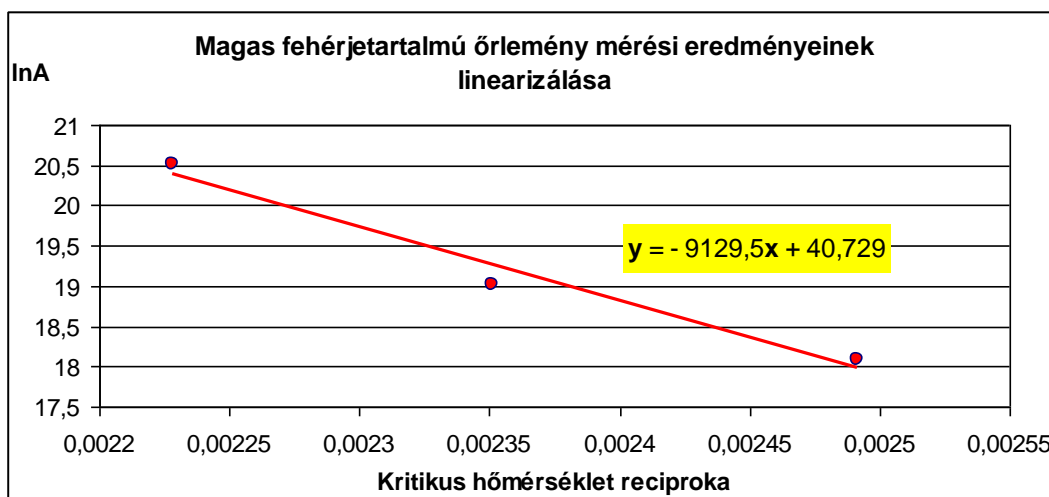
Innen az adott anyag öngyulladásai hajlamának meghatározásául szolgáló egyenlet:

$$\delta = e^{41,927} \cdot \frac{r^2}{T_a^2} \cdot e^{-\frac{9675,1}{T_a}} \quad (10.)$$



## 4.1.2. Magas fehérjetartalmú CGF adatsorai

Minta élhossza [cm]	Élfelező		Hőmérséklet			Abszolút kritikus hőmérséklet			$\ln \frac{\delta_{kr} \cdot T_{kr}^2}{r^2}$ (lnA)
	r [m]	r <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	t <sub>szub</sub> [°C]	t <sub>szup</sub> [°C]	t <sub>kr</sub> [°C]	T <sub>kr</sub> [K]	1/T <sub>kr</sub> [K <sup>-1</sup> ]	(T <sub>kr</sub> ) <sup>2</sup> [K <sup>2</sup> ]	
5	0,025	0,000625	174,2	177,1	175,7	448,8	0,002228	201421,44	20,515172
10	0,05	0,0025	151,3	153	152,1	425,3	0,002351	180880,09	19,021313
15	0,075	0,005625	127,5	128,9	128,2	401,35	0,002491	161081,82	18,094461



10. ábra: Magas fehérjetartalmú CGF mérési eredményeinek linearizálása

$$y = -9129,5x + 40,729 \quad (12.)$$

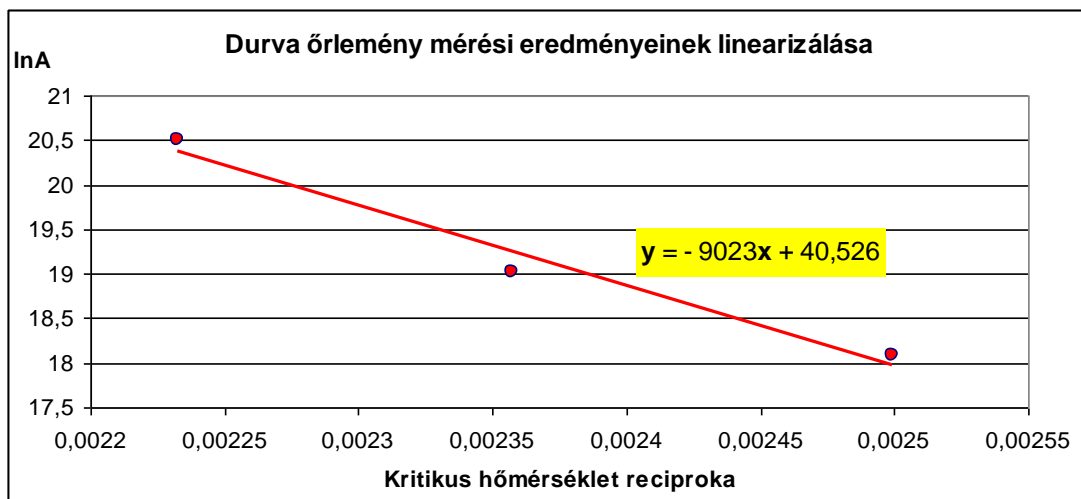
Innen az adott anyag öngyulladásai hajlamának meghatározásául szolgáló egyenlet:

$$\delta = e^{40,729} \cdot \frac{r^2}{T_a^2} \cdot e^{-\frac{9129,5}{T_a}} \quad (13.)$$

## 4.1.3. Durva CGF dara adatsorai



Minta élhossza [cm]	Élfelező		Hőmérséklet			Abszolút kritikus hőmérséklet			$\ln \frac{\delta_{kr} \cdot T_{kr}^2}{r^2}$ (lnA)
	r [m]	r <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	t <sub>szub</sub> [°C]	t <sub>szup</sub> [°C]	t <sub>kr</sub> [°C]	T <sub>kr</sub> [K]	1/T <sub>kr</sub> [K <sup>-1</sup> ]	(T <sub>kr</sub> ) <sup>2</sup> [K <sup>2</sup> ]	
5	0,025	0,000625	174,2	175,5	175	448	0,002232	200704	20,511604
10	0,05	0,0025	149,8	152,3	151	424,2	0,002357	179945,64	19,016133
15	0,075	0,005625	129,5	124,5	127	400,15	0,002499	160120,0225	18,088472



11. ábra: Durva CGF dara mérési eredményeinek linearizálása

$$y = -9023x + 40,526 \quad (14.)$$

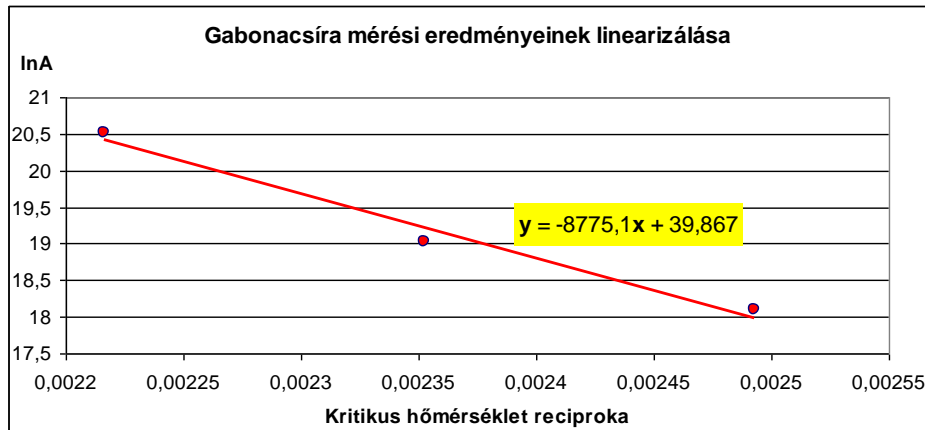
Innen az adott anyag öngyulladásai hajlamának meghatározásául szolgáló egyenlet:

$$\delta = e^{40,526} \cdot \frac{r^2}{T_a^2} \cdot e^{-\frac{9023}{T_a}} \quad (15.)$$





## 4.1.4. Kukoricacsíra adatsorai



Minta élhossza [cm]	Élfelező		Hőmérséklet			Abszolút kritikus hőmérséklet			$\ln \frac{\delta_{kr} \cdot T_{kr}^2}{r^2}$ (lnA)
	r [m]	r <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	t <sub>szub</sub> [°C]	t <sub>szup</sub> [°C]	t <sub>kr</sub> [°C]	T <sub>kr</sub> [K]	1/T <sub>kr</sub> [K <sup>-1</sup> ]	(T <sub>kr</sub> ) <sup>2</sup> [K <sup>2</sup> ]	
5	0,025	0,000625	176,4	179,5	178,1	451,25	0,002216	203626,5625	20,526061
10	0,05	0,0025	151,6	152,4	152	425,15	0,002352	180752,5225	19,020607
15	0,075	0,005625	127,5	128,5	128	401,15	0,002493	160921,3225	18,093464

12. ábra: Kukoricacsíra mérési eredményeinek linearizálása

$$y = -8775,1x + 39,867 \quad (16.)$$

Innen az adott anyag öngyulladásai hajlamának meghatározásául szolgáló egyenlet:

$$\delta = e^{39,867} \cdot \frac{r^2}{T_a^2} \cdot e^{-\frac{8775,1}{T_a}} \quad (17.)$$



## 4.2. Kiértékelés

$$\delta = e^{41,591} \cdot \frac{r^2}{T_a^2} \cdot e^{-\frac{9599,4}{T_a}} \quad (19.)$$

A kiértékelés a vizsgált anyagok esetében a kritikus értékek kiszámítását takarja a kapott egyenletek (11.), (13.), (15.), (17.), (19.) alapján. Az alkalmazott módszer lehetőséget kínál arra, hogy meghatározzuk milyen környezeti hőmérsékleten kell számítanunk öngyulladásra vagy adott tárolási hőmérséklet mellett mekkora az a térfogat, amelyben az öngyulladás veszélye fenn áll, illetőleg a kapott kísérleti eredményekből kiszámítható, hogy az öngyulladás mennyi idő elteltével következik be. Persze azt meg kell jegyezni, hogy a laboratóriumi mérésekhez használt méretek sokkal egyszerűbben alakíthatók izotróp anyagi halmazokká, ami természetesen nem igaz egy siló esetében, ahol az anyag a belső teret koránt sem egyenletesen tölti ki. A hely függvényében lényeges különbségek mutatkozhatnak, akár csak ha a sűrűséget vesszük, ami a (6) képletben is feltüntetett befolyásoló paraméter az öngyulladási hajlam meghatározásánál. [1]

### 4.2.1. Az értékelési módszer leírása

Az egyenleteket (11.), (13.), (15.), (17.), (19.) kétféle módon lehet alkalmazni:

Első esetben, amikor arra vagyunk kíváncsiak, hogy egy adott méretű anyagnál, ha változtatjuk a környezeti hőmérsékletet, hogyan változik az öngyulladási hajlamot jellemző Frank-Kamenyckij paraméter. Ilyen esetben, az egyenletekben az  $r$  rögzített és a  $T_a$  (környezeti hőmérséklet) változó értékeit vizsgáljuk.

Az értékelésben alkalmazott másik esetben, amikor arra vagyunk kíváncsiak, hogy egy adott környezeti hőmérsékleten, ha változtatjuk a tárolt minta térfogatát, akkor hogyan változik a Frank-Kamenyckij paraméter. Ekkor az egyenletekben a  $T_a$  rögzített, az  $r$  a méretre jellemző érték pedig változó.

Az első esetnek az illusztrálására, vegyük példának a durva darat. Legyen  $r = 1,11$  m (egy 2,22 m élhosszúságú kocka, ami kb.  $10 \text{ m}^3$  térfogatnak felel meg), a környezeti hőmérséklet  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Természetesen a hőmérsékletet át kell számítani Kelvin fokra, azaz  $T_a = 293,15 \text{ K}$ .

A F-K paraméter a **durva CGF** darare számítható a következő egyenletből (15.):



Tovább folytatva a számítást kapjuk:

$$\delta = \frac{E \cdot \rho \cdot \Delta H_r \cdot r^2}{R \cdot k \cdot T_a^2} \cdot A \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_a}} = 3,983 \cdot 10^{17} \cdot \frac{r^2}{T_a^2} \cdot e^{-\frac{9023}{T_a}} \quad (20.)$$

Az 1. táblázatban a kockához tartozó kritikus paraméter  $\delta_0 = 2,52$ , így a számított  $\delta = 0,245$

$$\delta = 3,983 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1,232}{85937} \cdot 4,29 \cdot 10^{-14} = 0,245 \quad (21.)$$

kisebb, vagyis az ilyen térfogat esetén 20 °C-on nem várható a rendszer öngyulladás.

Ha megváltoztatjuk a magasabb környezeti hőmérsékleteken az anyag viselkedését, akkor azt láthatjuk, hogy 30 °C-on,  $T_a = 303,15$  K, akkor  $\delta = 0,632$ , de amennyiben 50 °C-ra,  $T_a = 323,15$  K növekszik a hőmérséklet, akkor  $\delta = 3,51$ -nek adódik és ekkor, az egyenlőtlenség megfordul  $\delta > \delta_0$ , ami azt jelenti, hogy ezen a hőmérsékleten már várható a rendszer öngyulladása. [1]



## 4.2.2. A tárolási hőmérséklet kritikuságának meghatározása

A kiértékelés eredményének kézzelfoghatóbb szemléltetésére a magyarországi **évi középhőmérséklet, 11 °C-t<sup>13</sup>**, valamint a KSH adatok alapján átlagos kapacitásúnak mondható, közel ezer köbméteres siló méretarányainak megfelelő kockához tartozó 10 m-es élhosszt választva. Az öngyulladás hajlamok az egyedileg minden anyagra meghatározott egyenletek (11.), (13.), (15.), (17.), (19.) felhasználásával az alábbiak szerint alakultak:

### Alacsony fehérjetartalmú CGF

$$\delta = e^{41,927} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9675,1/T_a} = 1,617 \times 10^{18} \times 5^2 / 284,15^2 \times 1,631 \times 10^{-15} = \mathbf{0,81} \quad (22.)$$

Az eredményül kapott érték jóval alacsonyabb, mint az alapérték, ezért a reláció  $\delta < \delta_o$  szerint alakul, azaz **0,81 < 2,52**, így 11 °C-on történő tárolásakor az anyag **öngyulladása nem várható**.

### Magas fehérjetartalmú CGF

$$\delta = e^{40,729} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9129,5/T_a} = 4,879 \times 10^{17} \times 5^2 / 284,15^2 \times 1,112 \times 10^{-14} = \mathbf{1,68} \quad (23.)$$

A kapott érték alacsonyabb, mint a kritikus érték, mivel  $\delta < \delta_o$ , azaz **1,68 < 2,52**, így ebben a térfogatban az anyag **öngyulladása nem várható** 11 °C-on történő tárolásakor.

### Őrölt kukoricacsíra

$$\delta = e^{40,526} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9023/T_a} = 3,983 \times 10^{17} \times 5^2 / 284,15^2 \times 1,619 \times 10^{-14} = \mathbf{1,99} \quad (24.)$$

A kapott érték az előzőnél ugyan magasabb, de ennek ellenére megállapítható, hogy  $\delta < \delta_o$ , azaz **1,99 < 2,52**, vagyis az anyag **öngyulladása nem várható** 11 °C-on.

### Kukoricacsíra

$$\delta = e^{39,867} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-8775,1/T_a} = 2,061 \times 10^{17} \times 5^2 / 284,15^2 \times 3,873 \times 10^{-14} = \mathbf{2,47} \quad (25.)$$

Az eddigi legmagasabb érték közelebb esik ugyan a kritikus értékhez, de még ugyancsak azt jelzi, hogy a gabonacsíránál is  $\delta < \delta_o$ , azaz **2,47 < 2,52**, vagyis ennél az anyagnál **még éppen nem várható** az anyag **öngyulladása** 11 °C-on.

<sup>13</sup> Forrás: [9]



A kapott értékek egyes anyagok, mint például a kukorica csíra tekintetében, nagyon beszédesen jelzik, hogy a megválsztott éves átlaghőmérséklet már igen közel eshet a kritikus hőmérséklethez, amit a következőkben számított kritikus hőmérsékletek vonatkozó adataival történő összevetés egyértelműen igazolhat.

A kiértékelések további részében az Orosz Föderáció Rendkívüli Helyzetek Minisztériuma Tűzvédelmi Tudományos Kutatóintézetében kidolgozott és 2004-ben közreadott módszertani segédlet szerinti metodológiára<sup>14</sup> támaszkodva kerülnek meghatározásra a keresett paraméterek.

### 4.2.3. A kritikus tárolási hőmérséklet meghatározása

A kapott egyenletek segítségével további lehetőségként adódik, hogy a már KSH adatok alapján átlagos méret mellett meghatározzuk azt a kritikus hőmérsékleti értéket, amely mellett a vizsgált anyagok öngyulladás bekövetkezhet.

A keresett hőmérsékleti értékeinek kalkulálására a képletben szereplő hőmérsékletek iterációs úton<sup>15</sup> történő generálásával egyszerűen eljuthatunk az eredményekhez, amelyek a 3 számú táblázatban kerültek megjelenítésre:

#### Alacsony fehérjetartalmú CGF

$$\delta = e^{41,927} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9675,1/T_a} = 1,617 \times 10^{18} \times 5^2 / 294,52^2 \times 5,41 \times 10^{-15} = \mathbf{2,52} \quad (27.)$$

#### Magas fehérjetartalmú CGF

$$\delta = e^{40,729} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9129,5/T_a} = 4,879 \times 10^{17} \times 5^2 / 288,02^2 \times 1,713 \times 10^{-14} = \mathbf{2,52} \quad (28.)$$

#### Őrölt kukoricacsíra

$$\delta = e^{40,526} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9023/T_a} = 3,983 \times 10^{17} \times 5^2 / 286,39^2 \times 2,075 \times 10^{-14} = \mathbf{2,52} \quad (29.)$$

#### Kukoricacsíra

$$\delta = e^{39,867} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-8775,1/T_a} = 2,061 \times 10^{17} \times 5^2 / 284,34^2 \times 3,954 \times 10^{-14} = \mathbf{2,52} \quad (30.)$$

A visszaellenőrzés nyomán látható, hogy a kapott kritikus hőmérsékleti értékek mellett az alapul vett térfogatokban a F-K paraméter értékek mindenütt éppen egyenlőnek adódnak az adott geometriai formához tartozó normatív értékkel, így rögzíthető, hogy  $\delta = \delta_0$ , azaz  $\mathbf{2,52} =$

<sup>14</sup> Forrás: [10]

<sup>15</sup> Forrás: [11],



**2,52**, vagyis az anyagok ezen hőmérsékleten vagy minimálisan is efelett történő tárolásakor az **öngyulladásuk** bekövetkezése beavatkozás nélkül valóban **várható**.

$r^*$ (m)	$T_{kr}$ (K)
Alacsony fehérjetartalmú CGF	
5,0	<b>294,52</b>
Magas fehérjetartalmú CGF	
5,0	<b>288,02</b>
Örölt kukoricacsíra	
5,0	<b>286,39</b>
Kukoricacsíra	
5,0	<b>284,34</b>

\* átlagos terménytároló méret (KSH nyomán)

## 2. számú táblázat:

Adott méretű terménytárolókban tárolt anyagokhoz tartozó kritikus hőmérsékletek számított értékei

### 4.2.4. A kritikus tárolási méret meghatározása

Az elméleti kritikus mérethez tartozó élfelező hosszának értékei a (6.) alapképlet rendezésével

$$r = \sqrt{\frac{kRT_k^2 \delta_{kr} e^{\frac{E}{RT_k}}}{E \Delta H_{\epsilon} A \rho}} \quad (32.)$$

nyert egyenlet segítségével került meghatározásra:

A képletben szereplő kiemelten fontos környezeti hőmérsékleti értéként felvett 38,75 °C (311,9 K) a hazai nyári időjárási megfigyelések alapján rögzített OMSZ adatok maximális hőmérsékleti adatainak<sup>16</sup> átlagaiként adódott.

<sup>16</sup> Forrás: [9].





A számítás folyamatában meghatározásra került a Rayleigh-szám (33.) egyenlet<sup>17</sup> szerinti

$$Ra = \frac{g}{\nu a} D^3 \frac{RT_{kr}}{E}$$

kalkulált értékének felhasználásával:

(33.)

ahol:

$g$  – gravitációs gyorsulás, (m/s<sup>2</sup>);

$\nu$  – a levegő kinematikai viszkozitása  $T_{kr}$  hőmérsékleten, (m<sup>2</sup>/s);

$a$  – a levegő hőmérséklet-vezetési tényezője  $T_{kr}$  hőmérsékleten, (m<sup>2</sup>/s);

$D$  – a vizsgált gabonátároló magassága, (m);

$R$  – egyetemes gázállandó, J/(mól • K);

$T_{kr}$  – a vizsgált agyagi halmaz környezeti hőmérséklete, (K);

$E$  – aktiválási energia (J/mól).

A képletben szereplő előtag kiszámítására használt (34.) egyenlet<sup>18</sup>:

$$\frac{g}{\nu a} = 1,2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{kr}}} \quad (34.)$$

Az így kapott érték segítségével számítható a hőátadási együttható ( $\alpha$ ) a (35.) egyenletek nagyságrendileg megfelelő változatába történő behelyettesítéssel:

$$\alpha = 0,54Ra^{0,25} \frac{k_{lev}}{D} + 4\sigma T_{kr}^3 \quad \leftarrow Ra \leq 2 \cdot 10^7 < Ra \quad \rightarrow \alpha = 0,135Ra^{0,33} \frac{k_{lev}}{D} + 4\sigma T_{kr}^3$$

ahol:

(35.)

$\sigma$  – Boltzmann állandó, (W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>);

$k_{lev}$  – a levegő hővezetési tényezője<sup>19</sup>, (W/m·K).

$\alpha$  értékének ismeretében a (36.) egyenlet felhasználásával kiszámítjuk a Biot-számot:

$$Bi = \frac{\alpha r}{k} \quad (36.)$$

Majd azt behelyettesítve a (37.) képletbe<sup>20</sup> meghatározzuk az anyag levegővel való hőcseréjének intenzitását jellemző értéket:

$$\varphi(Bi) = \frac{Bi}{2} \left( \sqrt{Bi^2 + 4} - Bi \right) \cdot e^{\frac{\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi - 2}{Bi}} \quad (37.)$$

<sup>17</sup> Forrás: [10], 6. o. (1)

<sup>18</sup> Forrás: [10], 7. o. (2)

<sup>19</sup> Forrás: [10], 7. o. (5), ( $k_{lev} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot T_{kr}$ )

<sup>20</sup> Forrás: [10], 8. o. (7)



Ezt követően az adott anyagban lezajló oxidációs reakciókat jellemző  $\gamma^{21}$  és  $\beta^{22}$  tényezőket határozzuk meg, amelyek matematikailag a (33.) és (34.) képletekkel fejezhetők ki:

Kiszámításukhoz minden anyag esetében a laboratóriumi kísérletek nyomán kapott (11.), (13.),

$$\gamma = \frac{cRT_{kr}^2}{E\Delta H_\xi} \quad (38.)$$

$$\beta = \frac{RT_{kr}}{E} \quad (39.)$$

(15.), (17.), (19.) egyenletek szolgáltak alapul, hisz jól látható módon azok matematikailag a Frank-Kamenyeckij paraméterben benne foglaltnak.

Ezt követően a (40.) egyenlet alkalmazásával számítjuk a kritikus Frank-Kamenyeckij

$$\delta_{kr} = \delta_o \varphi(Bi)(1 + \beta)(1 + 2,4\gamma^{\frac{2}{3}}) \quad (40.)$$

paramétert:

ahol:

$\delta_o$  – Az 1. táblázatban a kockához tartozó kritikus paraméter;

Ezen értéket behelyettesítve a (32.) egyenletbe első közelítésben megkapjuk kritikus élfelező értékeit. Ezt követően Újra számítva a Rayleigh-számot, melynek felhasználásával az előbbieken ismertetettek szerinti sorrendben kiszámítjuk ismételt  $r_{kr}$  új értékét. Ezt mindaddig végezzük, míg az előzőleg kapott értékhez viszonyítva a különbség 5% alá nem eszik.

Az így kapott végleges kritikus élfelező értékeket a 3. táblázatban kiemelve találhatók.

Meghatározás számítási paraméterei									
$r_{kr}$ (m)	$T_k^*$ (K)	$R_a$ ( $10^{10}$ )	$\alpha$	Bi	$\varphi(Bi)$	$\beta$	$\gamma$	$\delta_{kr}$	$k_{lev}$
<b>Alacsony fehérjetartalmú CGF</b>									
<b>2,17</b>	311,9	9,30351	6,8816	124,83	0,9841	0,0322	0,00087	2,6158	0,02697
<b>Magas fehérjetartalmú CGF</b>									
<b>1,65</b>	311,9	4,31651	6,8816	87,500	0,9775	0,0341	0,00079	2,5998	0,02697

<sup>21</sup> Az anyag kiegészét jellemző paraméter

<sup>22</sup> Az oxidációs reakciót jellemző paraméter



Örölt kukoricacsíra									
<b>1,54</b>	311,9	2,52749	6,8816	89,078	0,9779	0,0345	0,00062	2,5941	0,02697
Kukoricacsíra									
<b>1,44</b>	311,9	2,12394	6,8816	83,283	0,9764	0,0355	0,00064	2,5933	0,02697

\* júl. max. átl. hőmérséklet (OMSZ) [9]

### 3. számú táblázat:

Terménytároló elméleti kritikus méretének meghatározása a laboratóriumi vizsgálati eredményeinek tükrében



## 4.2.5. A kritikus tárolási időtartam meghatározása

Az öngyulladás bekövetkezése normál környezeti kiinduló hőmérsékletek esetében egy időben igen elhúzódó folyamat. Ennek időtartama, valamennyi az előzőekben részletezett paramétertől függő tényező. Így szerepet játszik benne az anyagi minőség, az anyagi halmazt alkotó részecskék aprítottsági foka, a halom fizikai méretei, és annak a hőtranszport-folyamatokban igen lényeges alakító tényező, és természetesen a környezeti hőmérséklet. Amennyiben a megfelelő hosszúságú indukciós időtartam<sup>23</sup> telik el a felhasználásig, az anyag kitérőlését megelőzően, bekövetkezhet az öngyulladás.

Ömlesztett sűrűség $\rho^{24}$ kg/m <sup>3</sup>	Fajhő $c$ J/(kg × K)	Hővezetési tényező $k$ W/(m × K)	Égéshő $\Delta H_c^{25}$ MJ/kg	Aktiválási energia $E^{26}$ J/mól
<b>Alacsony fehérjetartalmú CGF</b>				
652,4	1602 <sup>27</sup>	0,12 <sup>28</sup>	18,6	75899,3
<b>Magas fehérjetartalmú CGF</b>				
652,45	1775 <sup>29</sup>	0,13 <sup>30</sup>	23,9	75902,66
<b>Örölt kukoricacsíra</b>				
609,85	1665,4 <sup>31</sup>	0,119 <sup>32</sup>	28,9	75017,22
<b>Kukoricacsíra</b>				
640,45	1665,4 <sup>33</sup>	0,119 <sup>34</sup>	28,9	72956,18

### 4. számú táblázat:

Vizsgált anyagok számításokban alkalmazott anyagi állandói

<sup>23</sup> A termikus indukciós alatt azt az időtartamot értjük, amely alatt a hő akkumulálódása gyulladáshoz vezet. [16]

<sup>24</sup> Forrás: [1]

<sup>25</sup> Forrás: [12] vonatkozó adatbázisából

<sup>26</sup> Forrás: [1] egyenlet exponenciális tagjának hatványkitevőjéből kiszámított értékek

<sup>27</sup> Forrás: [13], a 52. o. 12. táblázat hőmérséklet-vezetési tényező első két adatsora átlagával pontosítva

<sup>28</sup> Forrás: [13] 52. o. 12. táblázat első oszlop, első két sorában szereplő adatok átlaga

<sup>29</sup> Forrás: [14], 346. o. 2. táblázat Glutenin adatsorai átlaga

<sup>30</sup> Forrás: [13] 34. o. 3. táblázat 10 %-os (légszár az állapothoz legközelebbi) nedvességtartalomhoz tartozó adat

<sup>31</sup> Forrás: [15]  $c = 1650 + 1,4W_c$  képlettel számított érték (nyers csíra nedvességtartalma,  $W_c \approx 11,0\%$ )

<sup>32</sup> Forrás: [16] 1.13 táblázat kukorica adatsorából,

<sup>33</sup> Forrás: [15]  $c = 1650 + 1,4W_c$  képlettel számított érték (nyers csíra nedvességtartalma,  $W_c \approx 11,0\%$ )

<sup>34</sup> Forrás: [16] 1.13 táblázat kukorica adatsorából,



A kritikus állapotok esetén az öngyulladás idő (s) meghatározására a (41) egyenlet alkalmazható:

$$\tau_{gy} = \frac{\tau c R T_0}{A E \Delta H_{\dot{e}}} e^{\frac{E}{R T_0}} \quad (41.)$$

Ahol:  $\tau_{gy}$  – a gyulladási idő<sup>35</sup>,

$\tau$  – a dimenzió nélküli indukciós idő, [10]

Az egyenlet szerinti indukciós idő kiszámításához első lépésben a kísérleti úton kapott (11.), (13.), (15.), (17.), (19.) egyenletek felhasználásával meg kell határozni az adott anyag vizsgált

$$\Delta = \frac{\delta_{kr}}{\delta_o} \quad (42.)$$

tárolási hőmérsékleten vett és a kritikus hőmérséklethez tartozó (2,52) F-K-paraméterek  $\Delta$ -val jelölt, az öngyulladás határtól való relatív eltérését:

Valamint szükséges a kockaformához tartozó alaki tényező meghatározása:

A képletben szereplő  $\sigma$  a Frank-Kamenjitszkij és Szemjonov gömb-ekvivalensek sugarainak arányát kifejező érték. Számítására a következő egyenlet szolgál:

$$j = 3\sigma - 1 \quad (43.)$$

$$\sigma = \frac{R_o^2}{R_{sz}^2} \quad (44.)$$

ahol:

$R_o^2$  – Frank-Kamenjitszkij gömb-ekvivalens sugara

$R_{sz}^2$  – Szemjonov gömb-ekvivalens sugara

Előző meghatározása az „r” jellemző mérettel rendelkező tároló és a Frank-Kamenjitszkij gömb-ekvivalensek sugarainak arányát kifejező egyenlet<sup>36</sup> számított értékének segítségével

$$\frac{r^2}{R_o^2} = \frac{2}{3\pi} \left[ 2 \arctg \left( \frac{p}{\sqrt{2+p^2}} \right) + \frac{1}{p^2} \arctg \left( \frac{1}{p\sqrt{2+p^2}} \right) + \frac{\sqrt{2+p^2}}{p} \right] \quad (45.)$$

történt:

<sup>35</sup> A rendszer hőveszteség nélkül bekövetkező meggyulladásáig terjedő időtartam. [2]

<sup>36</sup> Forrás: [10] 26. o. (II 11)



ahol:

$p$  – egyenlő oldalarányok miatt a kocka esetében 1-nek<sup>37</sup> adódik.

A Szemjonov gömb-ekvivalens sugarát a tároló térfogata és felszíne hányadosának felhasználásával határozhatjuk meg a következők szerint:

$$R_{sz} = 3V/S \quad (46.)$$

ahol:

$V$  – tároló térfogata

$S$  – tároló felszíne

Az fentiekben számított értékek, valamint a (38.), (39.) képletek adott hőmérsékleti értékre vonatkoztatott értékeit alábbi függvényekbe behelyettesítve:

$$f_1(\Delta, \gamma) = 1 + 0,62 \frac{1 - 4\Delta^{-2}\sqrt{\gamma}}{\Gamma\Lambda - 0,95\gamma^{0,9}} \quad (47.)$$

$$f_2(j, Bi, \Delta) = 1 - \frac{[1 + 1,5(1 - 0,1\Delta)j]Bi}{16(1 + Bi)} \quad (48.)$$

meghatározzuk a (41.) egyenletben szereplő, dimenzió nélküli ( $\tau$ ) indukciós idő értékét az alábbiak szerinti számítással:

Ennek (41.) egyenletbe történő behelyettesítésével ( $\tau_{gy}$ ) indukciós időkre kapjuk az 5. számú

$$\tau = f_1(\Delta, \gamma)f_2(j, Bi, \Delta)(1 + 2\beta) \quad (49.)$$

táblázatban szereplő értékeket.

A kiértékelést és a bemutatott számításokat elvégezve a nyári átlagos (23,0 °C)<sup>38</sup>környezeti hőmérsékletre, valamint , az előző siló méretarányainak megfelelő 10 m-es élhosszt választva.

Az öngyulladás időtartamok az alábbiak szerint alakultak:

$\tau_{gy}$ (d)	$T_o$ (K)	* $T_{kr}$ (d)	$T_{kr}$ (K)
Alacsony fehérjetartalmú CGF			
<b>103,5</b>	296,15	<b>15,5</b>	294,52

<sup>37</sup> Értéke [10] 26. o. (II 11)-ben megadott oldalarányok viszonyából származtatva

<sup>38</sup> Forrás: OMSZ, A nyarak átlaghőmérséklete 1981–2010 között 20–26°C.” [9]



Magas fehérjetartalmú CGF			
<b>65,4</b>	296,15	<b>9,0</b>	288,02
Örölt kukoricacsíra			
<b>54,7</b>	296,15	<b>7,9</b>	286,39
Kukoricacsíra			
<b>49,3</b>	296,15	<b>7,2</b>	284,34

\***kritikus méret** és magyarországi nyári **hőhullámok maximális hőmérsékleteinek** átlaga **mellett**

## 5. számú táblázat:

Adott méretű terménytárolókban tárolt anyagokhoz tartozó kritikus hőmérsékletek számított értékei

A kapott értékek láthatóan jól illeszkednek a nemzetközi szakirodalomban és kézikönyvekben foglalt tárolási időtartamokra vonatkozó adatokhoz.

Például a szabványokban az örölt kukoricacsíra tárolása esetén az önmelegedési folyamat kritikus hőmérsékletének szintjét 35 - 40 °C hőmérsékletre teszik. Ez egy olyan hőmérséklet, amely a felhalmozott takarmányon belül könnyen el lehet érni. A tárolási hőmérséklet ezen anyag esetében nem lépheti túl a 35 °C-ot. [18]

Ezzel egybe csengenek az 5. táblázat utolsó két sorában kiemelt adatok. Hisz az első oszlopban feltüntetett, kalkulált hosszú periódus idejének értéke 54,7 nap, de még az egész csíra esetén is 49,3 nap 23 °C-on számolva, szemben a 38 °C környezeti hőmérséklet mellett adódó viszonylag 7,9 napos rövid idukciós periódusával.

## 5. ZÁRSZÓ

A mezőgazdaságban termesztett növények egész évi ellátást biztosító mennyiségének előállítása főként a természetes vegetációs időszakában történik. A későbbi felhasználásra nagytömegben megtermelt takarmányokat a már az előzőekben többször említett nagy befogadóképességű terménytárolókban helyezik el. Az elhúzódozó ütemű fogyasztás miatti





hosszúidejű tárolás azonban jelentősen növeli az öngyulladás veszélyét. Az általam elvégzendő laboratóriumi vizsgálatok e veszély megítélésében szolgáltathatnak alapot a kiválasztott anyagokat illetően.

A tűzvédelmi mérnöki szaktudás ezért elengedhetetlen, úgynevezett kritikus körülmények laboratóriumi definiálása terén, mely vizsgálati eljárások segítségével meghatározhatók azok az öngyulladást eredményező termodinamikai folyamatok lényeges összetevői.

Az ezen cikkben ismertetett anyagok elsődleges vizsgálataival nyert eredmények segítségével a tűzvédelmi gyakorlatban hasznosítható eredményekre vezettek a kutatás nyomán feltárt paraméterek, amelyek különösen fontosakká az elkövetkező években.

Hiszen a magyar mezőgazdasági élelmiszer- és takarmánytermelés jövedelmezőségének növelésére létrehozott támogatási rendszer egyik fontos elemeként elindított projektek nyomán várhatóan jelentősen növekedni fognak a termelők tárolási kapacitásai, amelynek mennyiségi oldalról igényelnek fokozott figyelmet a tűzvédelem tekintetében.

Másfelől az itt felvonultatott módszertan segítségével kinyerhető adatokra támaszkodva megállapítható, hogy az éghajlatváltozás hozta étlaghőmérsékletek növekedése, valamint a Magyarországi klímatis viszonyok változásai tekintetében igazolt hosszabbá és gyakoribbá váló hőhullámok bizonyosan igénylik a hatékony megelőzési stratégiák kialakítását a tűzvédelmi mérnöki gyakorlatban.

Az itt felhasznált módszertannal sikerült igazolni, hogy a laboratóriumi vizsgálati eljárásokkal azonosított fizikai paraméterek nyomán eldönthető, miként válasszuk meg azokat, a tárolási körülményeket, amelyekkel tűzvédelmi oldalról is garantálható a tárolt takarmányok minősége.

Mindezt azonban oly módon kell lefordítani a tűzbiztonság mérnöki nyelvezetre, hogy a vizsgálatok segítségével előállított eredmények egyértelműen értelmezhetők legyenek termelők, gazdák és a gyakorlati tűzvédelmi szakemberek számára. Ennek szándéka húzódik meg az itt bemutatottak mögött is.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Nagy R.: A növényi anyagok öngyulladásának laboratóriumi vizsgálata, Szakdolgozat, 2015., Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Tűz- és Katasztrófavédelmi Intézet;



- [2] Beda L. – Kerekes Zs.: Égés és oltáselmélet II., jegyzet, 2006, ISBN 978-963-9483-21-2;
- [3] Brian F. Gray: Spontaneous Combustion and Self-Heating, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Greenbelt, MD, USA 2016., ISBN 978-1-4939-2565-0, pp. 604;
- [4] Химическая Энциклопедия, в пяти томах, Издательства «Большая Российская Энциклопедия» Москва, 1995, ISBN 5-85270-092-4 (т. 4) 289. о.;
- [5] INSTRUCTION MANUAL: Heraeus T5042E oven 1994, Gemini BV Laboratory.
- [6] ALMEMO® Universalmeßgeräte ALMEMO 2690-8 Data Logger [2004] Operating Instructions, Ahlborn GmbH, ; [www.ahlborn.com](http://www.ahlborn.com), (letöltve 2015. 05. 27.);
- [7] Nagy R.: Növényi anyagok öngyulladásának vizsgálata, Bánki Közlemények, Budapest, 2015., ISBN:978-615-5460-56-2, pp. 1-13.
- [8] Nordtest Method NT Fire 045: Solid Materials: Spontaneous Ignition Temperature By Continuous Heating, <http://www.nordtest.info/images/documents/nt-ethods/fire/NT%20fire%20045%20Solid%20materials%20Spontaneous%20ignition%20temperature%20by%20continuous%20heating%20Nordtest%20Method.pdf>, (letöltve: 2021. 04. 26.);
- [9] Országos Meteorológiai Szolgálat: Magyarország - hőmérsékleti szélsőértékei, [https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag\\_eghajlata/homersekleti\\_szeloertekek/Magyarorszag/index.php?ful=7#aktp](https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/homersekleti_szeloertekek/Magyarorszag/index.php?ful=7#aktp), (letöltve 2021. 05. 28.);
- [10] Ю. Н. Шебеко - В. И. Горшков - И. А. Корольченко - А. С. Кухтин - В. Л. Крылов: Методика определения условий теплового самовозгорания веществ и материалов, МЧС России Москва, 2004., <https://meganorm.ru/Data2/1/4293819/4293819617.pdf>, (letöltve 2021. 04. 26.);
- [11] Франк-Каменецкий Д. А.: Диффузия и теплопередача в химической кинетике, Академия Наук Союза ССР, Институт Химической Физики, Москва 1947. 253 о., <http://books.e-heritage.ru/book/10080798>, (letöltve 2021. 05. 21.);
- [12] Valérie Bontems et al: The INRAE-CIRAD-AFZ tables, <https://www.feedtables.com/>, (letöltve 2021. 05. 26.);
- [13] Xin Jiang: Properties of feed ingredients and extruded products, Graduate Theses and Dissertation, Iowa State University, 2016., <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=6734&context=etd>, 52 о., (letöltve 2021. 04. 25.);
- [14] L. Di Gioia, B. Cuq, S. Guilbert: Thermal properties of corn gluten meal and its proteic components, International Journal of Biological Macromolecules, 1999., Vol. 24, ISSN:



- 0141-8130, [Thermal properties of corn gluten meal and its proteic components - ScienceDirect](#), p. 341-350; (letöltve 2021. 04. 27.);
- [15] I. Danko: Удельная теплоемкость зерна (часть 2), [Удельная теплоемкость зерна \(часть 2\) » Строительный онлайн-портал \(visacon.ru\)](#), (letöltve: 2021. 05. 26.);
- [16] В. И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин: Тепловая обработка зерна в установках контактного типа, Министерство Сельского Хозяйства Российской Федерации, Ульяновск, 2013; ISBN 978-5-905970-22-1, [Тепловая-обработка-зерна-в-установках-контактного-типа\\_Монография-1.pdf \(bjd-ugsha.ru\)](#), 25. о., (letöltve 2021. 06. 08.);
- [17] A Guide to Distiller's Dried Grains with Solubles: U.S. Grain Concl, p. 14., 2012., [12USGC-027\\_Cover\\_1b.pdf \(grains.org\)](#), (letöltve 2021. 06. 21.);
- [18] Сертификат Соответствия Продукция Зародыш кукурузный мокрого способа отделения, № 2116739, Система Сертификации Гост Р Федеральное Агентство По Техническому Регулированию и Метрологии, Воронеж г., 2016., <http://www.sp-don.ru/produkcija/zarodysh-kukuruznyj/>, (letöltve 2021. 06. 26.);

**Dr. Nagy Rudolf** adjunktus,

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

[nagy.rudolf@uni.obuda.hu](mailto:nagy.rudolf@uni.obuda.hu)

Rudolf Nagy PhD, assistant professor, Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering

ORCID azonosító: 0000-0001-5108-9728