

Nagy Rudolf¹  – Szabó Attila² 

A CGF-pellet öngyulladási hajlamának vizsgálata indirekt módszerrel

Investigation of the Self-ignition Tendency of CGF Pellets by an Indirect Method

A takarmánypelletek nagyüzemi állattartásban való felhasználása tekintélyes mennyiségi mutatók mellett folyik, ami együtt jár a nagy tárolási kapacitások megjelenésével és a CGF-pelletek alapanyagául szolgáló mezőgazdasági kultúrában éves ciklusidőkkel jellemzett kukorica tenyészidejének figyelembevételével való ki- és betárolási időtartamok akár tekintélyes idejű kitolódásával. A pelletálási eljárásban való előállításukat követően a tárolás során az állattartás számára fontos mutatók minőségromlását okozó, kedvezőtlen átalakulásuk zajlódhat le a megjelenő öngyulladási folyamatok következtében. Az idevezető bomlási folyamatokat felismerhetővé tevő, a következőkben bemutatott öngyulladási hajlam vizsgálata során azonosított kritikus termikus jellemzőket – a publikált gyakorlati tapasztalatokkal korreláló eredményeket igazoló – indirekt módszerrel állapítottuk meg.

Kulcsszavak: pellet, öngyulladás, vizsgálat, hőmérséklet, bomlás

The use of fodder pellets in large-scale livestock farming is subject to considerable quantitative indicators, which is accompanied by the emergence of large storage capacities and periods of up to a considerable duration, taking into account the growing seasons of maize in CGF pellets. After their production in the pelletization process, during storage, unfavourable transformations of indicators important for animal husbandry may occur due to the visible self-ignition processes. The critical thermal characteristics identified in the study of the self-ignition tendency presented

¹ Egyetemi adjunktus, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, e-mail: nagy.rudolf@uni-obuda.hu

² Intézetvezető, Katasztrófavédelmi Oktatási Központ, Katasztrófavédelmi Kutatóintézet, e-mail: attila.szabo.kok@katved.gov.hu

below, which make the decomposition processes leading to this recognisable, were established by an indirect method, confirming the results correlating with the published industrial experience.

Keywords: pellets, self-ignition, test, temperature, decomposition

1. Bevezetés

A világméretű kereskedelem volumenének mutatóit alapul vevő trendek elemzői szerint a nemzetközi takarmánypiacon a CGF felhasználása mértékének a 2018–2026 közötti intervallumban 5,8%-os növekedése prognosztizálható.³ A szakmai elemzésekből is kiolvasható a takarmányok összmenyiségén belüli részesedése nem igazán nevezhető kiemelkedőnek, azonban ez is várhatóan fokozódik a jövőben.⁴ Ez visszavezethető a világ teljes bioetanol-előállításának jövőbeli trendjét felvázoló elemzésekben szereplőkre, amivel összhangban az e takarmányforma nyersanyagául szolgáló szemestermény-felhasználás volumenének emelkedésével számolhatunk ebben a szektorban is.⁵

Ez köszönhető annak a technológiaváltásnak, amely egyebek mellett az Amerikai Egyesült Államokban (USA) is zajlik. Az USA mint a világ legjelentősebb kukorica-előállítója, rendkívüli módon megnövelte etanolüzemeinek a számát, köszönhetően az amerikai megújuló üzemanyagszabvány bevezetésének, amivel párhuzamosan a keletkező melléktermékek mennyisége is növekszik.⁶

E takarmányok közül kezelhetősége és szállítási tulajdonságai alapján a száraz CGF-nek előnyösebb jellemzői vannak.⁷ A száraz CGF-takarmány felhasználási formái közül kiserelésük tekintetében a leggyakoribbak a durva őrlemény vagy pelletformák.⁸

Ráadásul az ehhez társuló takarmányozási célú felhasználáson felül a pelleték fűtőanyagként való felhasználásának mértéke is töretlenül növekszik világszerte. Ennek egyik visszatükröződését láthatjuk az Európai Unióban (EU) is a zöldenergiák felhasználásának dinamikáját jelentősen felgyorsítani szándékozó döntésekben. Különösen fajsúlyosan mutatkozik ez meg a tagállamoknak juttatandó, a Covid-világjárvány kedvezőtlen gazdasági hatásait ellensúlyozni kívánó pénzügyi források ez irányú célzott felhasználási kikötéseiben is.⁹

³ Zion Market Research: *Gluten Feed Market By Source (Wheat, Corn, Barley, Rye, And Others) And By Livestock (Swine, Poultry, Cattle, Aquaculture, And Others): Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis, And Forecast, 2018–2026.* (2019. április 27.).

⁴ James Nason: *Livestock a Much Smaller Challenge to Global Food Security than Often Reported.* *BeefCentral.com*, 2017. szeptember 22.

⁵ Maximize Market Research: *Global Ethanol Market – Industry Analysis and Forecast (2020–2027) – by Feedstock Type, End User, and Region* (é. n.).

⁶ Kurt A. Rosentrater – Elif Kongar: *Costs of Pelleting to Enhance the Logistics of Distillers' Grains Shipping.* ASABE Paper No. BIO-097992. Seattle, 2009.

⁷ Rumela Bhadra – Kurt A. Rosentrater – Kasi Muthukumarappan: *Surface Characteristics and Flowability of Distillers Dried Grains with Solubles.* Paper No. 083811, 2008.

⁸ Myer Kutz (szerk.): *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering.* New York, Elsevier, 2015.

⁹ Eurostat: *Energy, transport and environment statistics 2020 edition.* Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

Mindezek fényében, érthetően, az ellátásbiztonság folyamatos fenntartása a növekvő mennyiségi mutatók terén az igényelt beszerzési források földrajzilag is mind kiterjedtebb hozzáférhetőségét követelik meg. Az akár globális léptékű szállítási útvonalak jelentősebb szállítási és tárolási kapacitások biztosítását teszik szükségessé.¹⁰

Az ehhez társuló szállítási, illetve elhúzódtó tárolási idő a pelleték önmelegedési hajlamából adódóan magában hordozza a felhalmozott termékek tűzveszélyét, mivel a spontán lezajló bomlási reakciók nyomán éghető gázok szabadulnak fel. Ezek a bomlástermékek éghetőségi koncentrációja fa pelleték esetén megfelelő tárolási körülmények között nem érik el az öngyulladásához szükséges értéket. Ellenben különösen a nyári időjárás okozta megemelkedett, jellemzően 35 °C feletti hőmérsékletek esetén már megnövekedett kockázattal számolhatunk.¹¹

Az ennek nyomán fenyegető tüzeset bekövetkezésének elengedhetetlen feltétele a halmozott részecskék felületén lezajló elemi reakciók szintjén bekövetkező oxidáció termelése és a rakomány vagy halomba rakott takarmánykészletek méretéhez képest rendkívül csekélynek nevezhető hő szűk térrészben történő akkumulációja. Általánosságban elmondható, hogy a nagy távolságú szállítások során, akár csak a silókban való tartós tárolásnál az öngyulladás-hoz vezethető kölcsönhatások a befolyásoló körülmények egyenletességének függvényében tipikusan ömlesztett anyaghalom belsejében, annak centrumában vagy ahhoz közel eső zónákban zajlanak le.¹²

A vizsgálatok igazolják, hogy az aprítási fok, azaz a részecskék mérete is befolyással van a fejlődő hő halom belsejében történő koncentrálódására. E tekintetben a pelleték kedvezőtlenebb makrostruktúrával rendelkeznek, aminek köszönhetően a fajlagos felület és a halomokban végbemenő tömörödés alacsonyabb szintje okán az ébredő konvektív áramok által való átjárhatóságuk elősegíti a hőleadást.¹³ Azonban a nagy távolságú a transzkontinentális szállítóhajók raktereibe és a silókba betárolt pelletált ömlesztett takarmány fizikai méreteinek viszonylatában a részecskeméret befolyásoló hatása már figyelmen kívül hagyható.¹⁴

Bár jól ismert ugyan, hogy a szilárd szerves anyagok öngyulladásai hajlama szoros összefüggésben van a fajlagos felülettel, ez azonban nem egy önmagában determináló tényező.¹⁵ Emellett másik lényeges tényezője az öngyulladásai folyamatoknak a nedvességtartalom, amely egy adott tartományig növeli a pelleték spontán meggyulladásának veszélyét.¹⁶ Így mint azt a nagy távolságú tengeri szállítások alatt bekövetkezett önmelegedéssel összefüggésbe

¹⁰ Nagy Rudolf – Földi László: A kritikus infrastruktúrák és védelmük nemzeti programja. *Polgári Védelmi Szemle*, 2. (2009), 1. 57–71.

¹¹ Jaap Koppejan et al.: *Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding*. IEA Bioenergy, 2013.

¹² Henry Persson: *Silo Fires Fire Extinguishing and Preventive and Preparatory Measures*. Karlstad, Swedish Civil Contingencies Agency (MSB), 2013.

¹³ Wendi Guo: *Self-Heating and Spontaneous Combustion of Wood Pellets during Storage*. Doctor of Philosophy in Chemical and Biological Engineering. Vancouver, The University of British Columbia, 2013.

¹⁴ Francesco Restuccia – Nieves Fernández-Áñez – Guillermo Rein: Experimental Measurement of Particle Size Effects on the Self-Heating Ignition of Biomass Piles: Homogeneous Samples of Dust and Pellets. *Fuel*, 256. (2019). 115838.

¹⁵ NFPA 499: *Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas*. 2013 Edition.

¹⁶ Robert Cubero-Abarca et al.: Use of Coffee (Coffea Arabica) Pulp for the Production of Briquettes and Pellets for Heat Generation. *Ciência e Agrotecnologia*, 38. (2014), 5. 461–470.

hozható balesetek is bizonyítják, a pelletek megfelelő biztonságtechnikai felügyelete is fontos összetevője a hajózársbiztonságnak. Az ezt szolgáló szabályozás kiindulópontját a tengerhajózás területén érvényes veszélyesáru-szállítási előírások alapját képező öngyulladási vizsgálatok eredményei adják.¹⁷

A silókban történő tárolási előírások esetében általában a Frank-Kamenyckij-módszert használják az ömlesztett anyagok tűzbiztonságának értékelésére.¹⁸ A módszer alkalmazását többek között a vonatkozó szabványok is részletesen leírják.¹⁹

Igaz ugyan, hogy a legtöbb ilyen és ehhez hasonló szabványos vizsgálat elsődlegesen a tanyakormányos stacioner, silókban történő tárolási körülményeinek az öngyulladások jelentette fenyegetettség kizárását szolgáló megelőző tűzvédelmi felügyeletét célozzák meg, azonban ez minden nagy tömegű megjelenési formáiban vizsgálandó kérdés a pelletek esetében. Még akár az élelmiszeripari vagy erdőgazdasági, illetőleg egyéb melléktermékek vagy hulladékfeldolgozásban ömlesztve tárolt halmokban is számottevő tényezőt képez.²⁰

Azonban a már említett hajóraktarokban történő ömlesztett áru mellett a vasúti szerelvények tehervagonjaiban szállított DDGS szállítása, kezelése és tárolása tekintetében is döntő fontosságúvá válik a környezeti tényezők függvényében az öngyulladási hajlam értékelése.²¹ Ennek köszönhetően pár napban rögzítik a vasúti szállítási szabályzatok a megbontás nélküli engedett fuvarozási időtartamot az átlagosnál magasabb nyári melegek beköszöntekekor.²²

A jelen kutatást illetően azonban lényeges tisztázni, hogy a biológiai rendszerekben lezajló öngyulladási 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 hővesztés sebességét, és az ennek nyomán fellépő hőakkumuláció révén az anyag gyulladási hőmérsékletére hevüljön.²³

A fentihez hasonló sok tényező felhasználásával leírható öngyulladási 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, amelyek ezen összetett folyamatok termodinamikáját megfelelő részletességgel képesek feltérképezni.²⁴

¹⁷ *Safety investigation into the self-combustion of wood pellets in cargo hold no. 5 on board the Maltese registered bulk carrier VDUE At Point Lynas Anchorage, Liverpool, on 29 November 2016.* Marine Safety Investigation Report, 2017.

¹⁸ Peter Blomqvist et al.: *An Experimental Study of Spontaneous Ignition in Storages of Wood Pellets.* Fire and Materials Conference, San Francisco, USA, 2007.

¹⁹ Nordtest: *Guidelines for Storing and Handling of Solid Biofuels.* NT ENVIR 010. Oslo, Norway, Nordic Innovation Centre, (2008. október 14.).

²⁰ William Hogland – Marcia Marques: *Physical, Biological and Chemical Processes during Storage and Spontaneous Combustion of Waste Fuel. Resources, Conservation and Recycling,* 40. (2003), 1. 53–69.

²¹ Wolfgang Stelte: *Guideline: Storage and Handling of Wood Pellets.* Resultat Kontrakt (RK) Report. Taastrup, Denmark, Danish Technological Institute, Energy and Climate, Centre for Renewable Energy and Transport, Section for Biomass, 2012.

²² U.S. Grains Council: *A Guide to Distiller's Dried Grains with Solubles* (2012). 14.

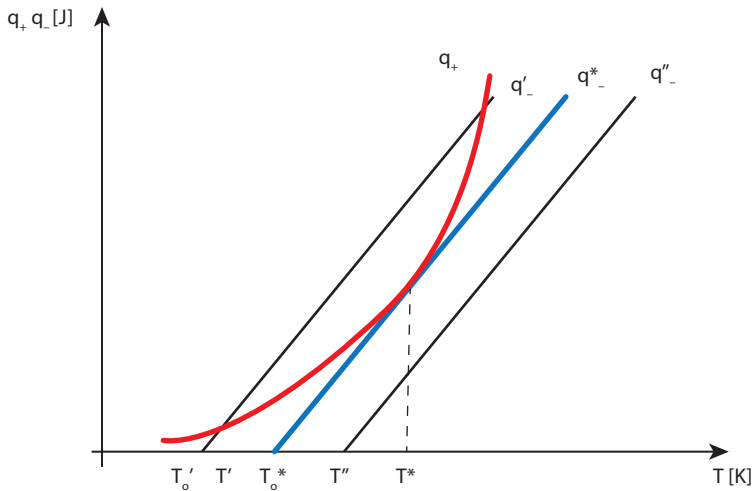
²³ Nagy Rudolf: *A növényi anyagok öngyulladásának laboratóriumi vizsgálata.* Szakdolgozat. Ybl Miklós Építéstudományi Kar Tűz- és Katasztrófavédelmi Intézet, 2015a.

²⁴ Beda L. – Kerekes Zs.: *Égés- és oltáselmélet II.* Jegyzet. Budapest, Szent István Egyetem, 2006.

A CGF-pelletek öngyulladásai hajlama tekintetében az egyik első, az Oroszországi Rendkívüli Helyzetek Minisztériuma által kidolgozott eljárás alapuló és részletesen ismertetett, teljes indirekt metodika alkalmazásával elvégzett vizsgálat. Az itt bemutatott módszertan eredményei nemcsak a CGF-pelletek silókban történő tárolásának tűzbiztonságát tanulmányozó kutatók számára nyújtanak módszertani segítséget, de az ömlesztett önmelegedő veszélyes áruk biztonságos szállításához szükséges körülmények meghatározásában is támpontot adnak a lehetséges dimenzionális jellemzők és indukciós időtartamok feltérképezését érintően.

2. A 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 vezet le a szilárd anyagok öngyulladásra való hajlamának leírását.²⁵ Ezt az 1. ábrán kiemelt grafikonok egymáshoz viszonyított helyzetéből is kiolvashatjuk.



1. ábra: Szemjonov-modell ábrázolása

Forrás: Химическая Энциклопедия. в пяти томах, Издательства «Большая Российская Энциклопедия» Москва, 1995. 289.

²⁵ Brian F. Gray: Spontaneous Combustion and Self-Heating. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Greenbelt, MD, 2016. 604–632.

2.1. Öngyulladás vizsgálata indirekt módszerrel

Az e 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 a rendszer belsejében mutatkozó hőforrás közvetlen környezetében még nem jelenti automatikusan azt, hogy a rendszerben öngyulladás is bekövetkezik. Ennek eldöntéséhez vissza kell kanyarodnunk az alapdefiníció 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 δ -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 izotróp és homogén a jellemző fizikai paraméterekre nézve, amelyek hőmérsékletfüggésétől eltekintünk.

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

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\dot{Q}^m}{k} = \frac{\partial T}{a \cdot \partial \tau} \quad (1)$$

egydimenziós alak, ahol:

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

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

a – a hőfokvezetési tényező [m^2 / 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:

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

ahol:

Θ – a dimenziómentes hőmérséklet,

E – az aktiválási energia [J/mól]

T – a minta belsejének hőmérséklete [K],

T_R – a referencia-hőmérséklet (általában egyenlő a környezeti hőmérséklettel) [K],

R – az egyetemes gázállandó [J × mól⁻¹ × K⁻¹].

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

$$\dot{Q}''' = \delta \cdot e^{\Theta} \quad (3)$$

ahol:

δ – a Frank-Kamenyckij-paraméter, dimenzió nélküli szám.

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

δ – Frank-Kamenyckij-paraméter, dimenzió nélküli szám,

$$\delta = \frac{E \cdot \rho \cdot \Delta H_r \cdot r^2}{R \cdot k \cdot T_R^2} \cdot A \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_R}} \quad (4)$$

E – az aktiválási energia [J/mól],

ρ – az anyag sűrűsége [kg/m³],

ΔH_r – termelődő reakcióhő [J × kg⁻¹ × s⁻¹],

r – a minta mérete [m],

A – a preexponenciális tényező, dimenzió nélküli szám,

R – az egyetemes gázállandó [J × mól⁻¹ × K⁻¹],

k – a hővezetési tényező [J × m⁻¹ × K⁻¹],

T_R – a 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 mintaméret változtatásával, vagy a kritikus hőmérsékletet határozzuk meg egy bizonyos mintaméretre úgy, hogy a minta állandó geometriája mellett a környezeti hőmérsékletet addig növeljük a mérésorozat során következő tagjában, míg öngyulladást nem tapasztalunk.

Az e körülmények között regisztrált paraméterekkel függvényt generálva a leolvasott függvényértékekből már δ számítható. Ehhez a Frank-Kamenyckij-paraméter a definiáló egyenletét (6) átírva, egyes tagjait tömörítő új jelöléseket bevezetve és átrendezve a következő formulát kapjuk:

$$\ln \frac{\delta \cdot T_R^2}{r^2} = P - \frac{E}{R \cdot T_R} \quad (5)$$

$$P = \ln \frac{E}{R} \cdot \rho \cdot \frac{\Delta H_r \cdot A}{k} \quad (6)$$

ahol:

δ – a Frank-Kamenyckij-paraméter, dimenzió nélküli szám,

T_R – a környezeti hőmérséklet [K],

r – a minta mérete [m],

P – a természetes alapú logaritmus hatványkitevője,

E – az aktiválási energia [J/mól],

R – az 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 δ_{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.²⁶

E hajlam részletes vizsgálata, tehát nemcsak önmagában tűzvédelmi oldalról számíthat érdeklődésre a szakemberek körében, de a mezőgazdasági állattartás népességnövekedéssel arányosan bővülő termelési volumenének fenntartása oldaláról is lényeges, mivel a biológiailag értékes takarmány-összetevők megőrzését is lehetővé teszik a termikus átalakulások oldaláról.

Az itt részletesen ismertetett a CGF-alapú takarmány-pellet termikus átalakulását feltáró módszertan bemutatásának célja a más növényi anyagok felhasználásával előállított pelletek kritikus öngyulladási paraméterei meghatározásában való felhasználás lehetőségének igazolása, illetőleg a metodológia ilyen módon történő helyes alkalmazása mellett kapott eredmények hitelességének igazolása a gyakorlati tapasztalatok tükrében.

Az ennek során alkalmazott vizsgálati metodika más, nem takarmányozási célú pelleték öngyulladási folyamatainak termikus azonosításában és ezen keresztül a veszélyes tárolási paraméterek kiküszöbölésében is hasznosíthatók.

²⁶ Beda–Kerekes (2006): i. m.

3. Anyagok és módszerek

Az öngyulladásai folyamatok vizsgálati anyagainak esetében nem mindegy, hogy milyen tűzkockázattal számolhatunk a gyakorlatban egyik vagy másik kukoricaalapú takarmány öngyulladása következtében. Az itt bemutatott vizsgálatokhoz kukoricaalapú 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 öngyulladásai folyamatokra gyakorolt hatásuk révén fontosnak ítélték az igen komoly biológiai aktivitással rendelkező enzimek. Az ehelyütt történő megemlékezés azért is lényeges, mivel a kukoricaalapú takarmányok öngyulladásának mechanizmusában kiemelt helyzetet foglalnak el azok a folyamatok, amelyek során az öngyulladását előidézőni képes hő képződik.

3.1.2. Vizsgálati minták

Pelletált CGF:

A pelletált biomassza egységes állagú és összetételű, fényes felületű, szagtalan anyag, 5–20 mm között változó hosszúságú, egységesen 5 mm körkeresztmetszetű (2. ábra) termék. Narancsvörös színű, kevés elmállott, porzó részecskét tartalmaz. Halmazában igen jelentős a ki nem töltött, levegővel szabadon átjárható hézag.²⁷



2. ábra: Pelletált CGF

Forrás: a szerzők felvétele

²⁷ Nagy (2015a): i. m.

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 (3. ábra) volt. A szárítószekrény hőszigetelt belső tere 27 × 35 × 42 cm³ 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 szolgált.



3. ábra: Heraeus 5042 T típusú kemence

Forrás: Gemini BV Laboratory Heraeus T5042E oven 1994 Instruction Manual, Gemini BV Laboratory

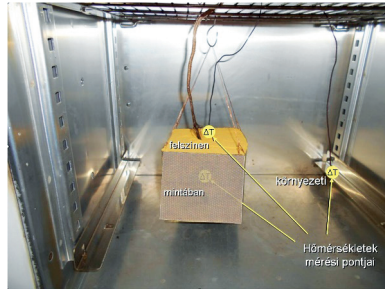
3.2.2. Minták elhelyezése

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 vörösrézhuvalból készült pántokat használtam. A pántokat a kockák két-két átellenes éleinek felső részén 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 rácszatra.

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 mérésére 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 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 körülbelül a felfüggesztett minta középpontját tekintve azonos magasságban és a belső légtér képzeletbeli másik függőleges harmadoló síkja, valamint a hosszanti felezősík által kimetszett pontra essen (4. ábra).



4. ábra: Vizsgálati elrendezés a szárítószekrény belső terében

Forrás: szerző saját felvétele

A hőmérsékleti adatokat az említett három ponton egy időben mértem. A mért adatokat az ALMEMO 2690-8 típusú adatgyűjtő eszközzel (5. ábra) rögzítettem. Az eszközhöz a jelek az előre programozott csatornák valamelyikén keresztül jutottak el, amelyekhez a csatlakozókkal egybeépített termoelemek a kemence tetején található és tűzoltó takaróból származó szövettel kibélelt nyíláson át kivezelve kapcsolódtak. Az adatgyűjtő egység LCD-kijelzőjén megjelenő hőmérsékleti értékek a mért közeg egy 15 másodperces ciklusidő alatt kialakuló hőmérsékletének felelnek meg.

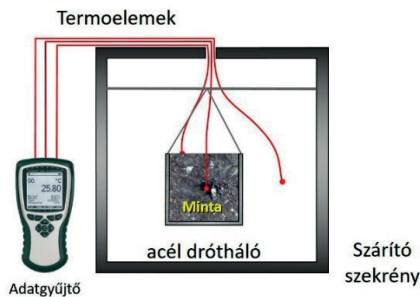


5. ábra: Adatgyűjtő eszköz

Forrás: www.ahlborn.com/de_DE/produkte/praezisionsmessgeraet-und-datenlogger-almemo-2690-8a

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.



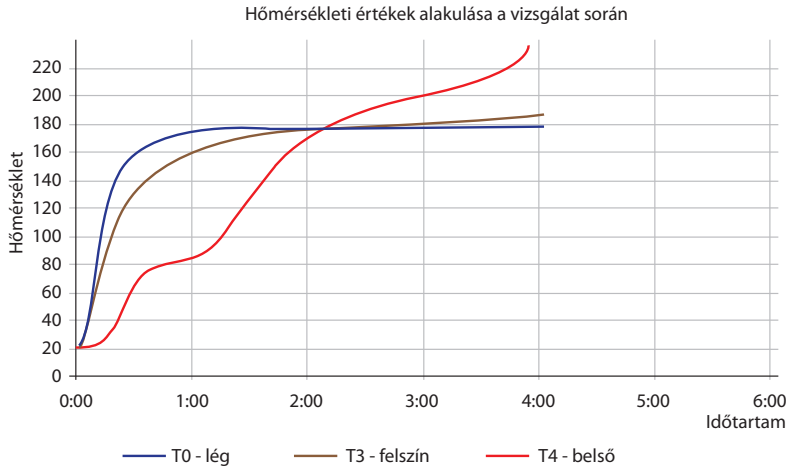
6. ábra: Vizsgálati berendezés vázlata

Forrás: Nagy Rudolf: Növényi anyagok öngyulladásának vizsgálata. In Kovács Tibor (szerk.): Biztonságtechnikai Szimpózium a Magyar Tudomány Ünnepe 2015 keretében. Budapest, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 2015b. 1–13.

Az alkalmazott modell segítségével a tárolási méret és az öngyulladási 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 mérőszorozattal. 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:

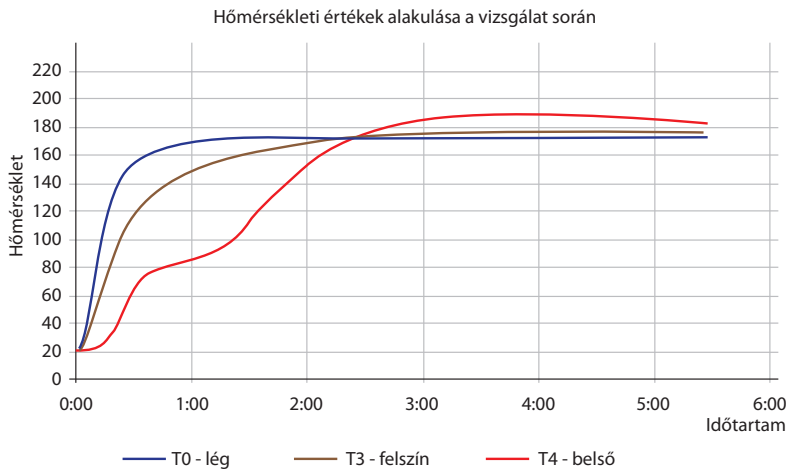
- Szubkritikus (T_{sub}) a vizsgált minta környezetének azon hőmérséklete, amelynél a minta hőmérséklete a szárítószekrény hőmérsékletét meghaladja, de a hőmérséklet-emelkedés nem éri el a 40 °C-t a környezeti hőmérséklet értékéhez viszonyítva;
- Szuperkritikus (T_{sup}) az a környezeti hőmérséklet érték, 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 hővesztések miatt visszahúl, ugyanakkor a másik szuperkritikus állapotba került anyagban a görbe a környezeti hőmérséklet fölötti tartományban dinamikus emelkedésbe kezd.



7. ábra: Szubkritikus görbemenet

Forrás: Nagy (2015b): i. m.



8. ábra: Szuperkritikus görbemenet

Forrás: Nagy (2015b): i. m.

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 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 öngyulladási hőmérsékletet (T_{kr}).²⁸

Majd mindezt az eljárást ugyanazon anyagra a másik két eltérő méretű mintatartó kockával is elvégeztem. Az így kapott kritikus hőmérsékleti értékeket felhasználva a kritikus paraméter meghatározására szolgáló (7) egyenletet linearizáltuk, és ábrázoltuk. Az egyenesek segítségével a 1. táblázatban szereplő, adott mintaalakhoz tartozón meghatározható a mintamennyiséghez és környezeti hőmérsékletéhez tartozó kritikus Frank-Kamenyckij-paraméter (δ). A kiértékelésben az elmélet szerinti alapvetésekre építve vizsgálandó a tesztek alapján meghatározott kritikus paraméter (δ_{kr}) és a vizsgálatban alkalmazott kocka geometriájához tartozó kritikus érték viszonya. Megjegyzendő, hogy a számításokban az 1. táblázatban szerepeltetett $2 \times r$ értékek estében az élfelező „r” értéket vesszük figyelembe.²⁹ 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 $\delta > \delta_{kr}$.

1. táblázat: Kritikus paraméterek és a geometriai jellemzők összefüggései

Geometria	Méreték	Kritikus paraméter (δ_{kr})	Θ_0
henger	sugár: $2 \times r$ magasság: $2 \times l$	$2 + 0,841 \frac{r^2}{l^2}$	
kocka	él: $2 \times r$	2,52	1,89

Forrás: Nordtest: *Solid Materials: Spontaneous Ignition Temperature By Continuous Heating (NT Fire 045) (1992. szeptember 14.)*

3.4. Elvégzett vizsgálatok

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

A későbbiekben az előzetesen behatárolt légtérhőmérsékletet környezeti paraméterként kiinduló alapként véve, rendre méréssorozatok elvégzésével megállapítottuk valamennyi takarmány mintáiban a szabványos eljárás szerinti térfogatokhoz rendelhető szuperkritikus hőmérsékleteket. A mérési adatok ezt követő kiértékelésével nyert és a vizsgálat szempontjából releváns adatokból kiderült, hogy a vizsgálati minták kisebb, a hibahatáron belülinek

²⁸ Nagy (2015b): i. m.

²⁹ Beda-Kerekes (2006): i. m.

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 linearizáltuk a mérési eredményeket. A kapott egyenes egyenletében szereplő együttműködőket, a Frank-Kamenyckij-paramétert definiáló eredeti egyenletének (6) megoldásában használtuk fel.³⁰

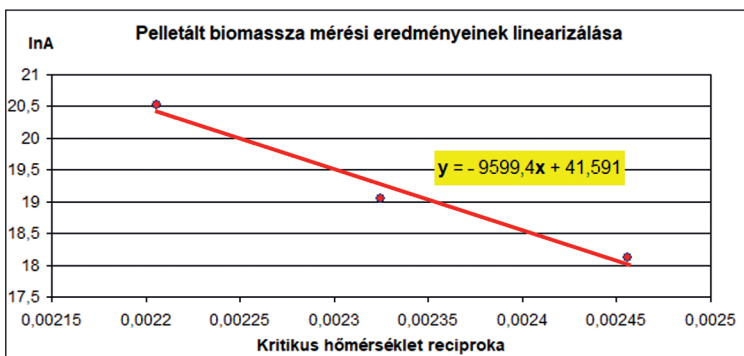
4.1. Eredmények

4.1.1. Pelletált CGF adatsorai

2. táblázat: Pelletált CGF mérési sorozatainak adatai

Minta élhossza [cm]	Élfelező		Hőmérséklet			Abszolút kritikus hőmérséklet			$\ln \frac{\delta_{kr} \cdot T_{kr}^2}{r^2}$ (lnA)
	r [m]	r^2 [m ²]	t_{szub} [°C]	t_{szup} [°C]	t_{kr} [°C]	T_{kr} [K]	$1/T_{kr}$ [K ⁻¹]	$(T_{kr})^2$ [K ²]	
5	0,025	0,00062	178,3	182	180,1	453,3	0,0022	205480,89	20,53
10	0,05	0,0025	155,1	158,9	157	430,15	0,0023	185029,02	19,04
15	0,075	0,00562	132,7	135,3	134	407,15	0,0024	165771,12	18,12

Forrás: a szerzők szerkesztése



9. ábra: Pelletált CGF eredményeinek linearizálása

Forrás: Nagy (2015b): i. m.

³⁰ Nagy (2015b): i. m. 11.

A kapott egyenes egyenlete a mérések alapján az alábbiak szerint adódott:

$$y = -9599,4x + 41,591 \quad (8)$$

Innen az adott anyag öngyulladási hajlamának meghatározásául szolgáló egyenlet:

$$\delta = e^{41,591 \cdot \frac{r^2}{T_a^2}} \cdot e^{-\frac{9599,4}{T_a}} \quad (9)$$

4.2. Kiértékelés

A kiértékelés a vizsgált anyagok esetében a kritikus értékek kiszámítását takarja a kapott egyenletek (9) 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 fennáll, 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 korántsem egyenletesen tölti ki. A hely függvényében lényeges különbségek mutatkozhatnak, akárcsak ha a sűrűséget vesszük, amely a (6) képletben is feltüntetett befolyásoló paraméter az öngyulladási hajlam meghatározásánál.³¹

4.2.1. Az értékelési metódus leírása

Az egyenleteket (9) 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 darát. Legyen $r = 1,11$ m (egy 2,22 m élhosszúságú kocka, ami körülbelül 10 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 CGF-pelletre számítható a következő egyenletből (9):

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

³¹ Nagy (2015a): i. m.

Tovább folytatva a számítást kapjuk:

Az 1. táblázatban a kockához tartozó kritikus paraméter $\delta_o = 2,52$, így a számított $\delta = 0,245$ kisebb, vagyis az ilyen térfogat esetén 20 °C-on nem várható a rendszer öngyulladása.

$$\delta = 3,983 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1,232}{85937} \cdot 4,29 \cdot 10^{-14} = 0,245 \quad (11)$$

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 $\delta > \delta_o$, ami azt jelenti, hogy ezen a hőmérsékleten már várható a rendszer öngyulladása.³²

4.2.2. A tárolási hőmérséklet kritikusságának meghatározása

A kiértékelés eredményének kézzelfoghatóbb szemléltetésére a magyarországi évi középhőmérséklet, 11 °C-ot³³, valamint a KSH-adatok alapján átlagos kapacitásának mondható, közel 1000 m³-es siló méretarányainak megfelelő kockához tartozó 10 m-es élhosszt választottuk. Az öngyulladásai hajlamok az egyedileg CGF-pelletre meghatározott egyenlet (9) felhasználásával az alábbiak szerint alakultak:

Pelletált CGF

$$\delta = e^{41,591} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9599,4/T_a} = 1,155 \times 10^{18} \times 5^2 / 284,15^2 \times 2,129 \times 10^{-15} = 0,76 \quad (12)$$

A kapott érték messze kisebb, mint a kritikus érték, azaz $\delta < \delta_o$, vagyis $0,76 < 2,52$, ezért 1000 m³-es térfogatban 11 °C-on történő tárolásakor az anyag *öngyulladása nem várható*.³⁴

A kapott értékek egyes anyagok, mint például a kukoricacsíra tekintetében, nagyon beszédesen jelzik, hogy a megválasztott 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 metodológiára³⁵ támaszkodva határozzuk meg a keresett paramétereket.

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 öngyulladása bekövetkezhet.

³² Nagy (2015a): i. m.

³³ Koppejan et al. (2013): i. m.

³⁴ Nagy (2015a): i. m.

³⁵ Persson (2013): i. m.

A keresett hőmérsékleti értékeinek kalkulálására a képletben szereplő hőmérsékletek iterációs úton³⁶ történő generálásával egyszerűen eljuthatunk az eredményekhez, amelyeket a 3. táblázatban jelenítettünk meg.

Pelletált CGF

$$\delta = e^{41,591} \times (r^2 / T_a^2) \times e^{-9599,4/T_a} = 1,155 \times 10^{18} \times 5^2 / 295,28^2 \times 7,608 \times 10^{-15} = 2,52 \quad (13)$$

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 $\delta = \delta_o$, azaz $2,52 = 2,52$, vagyis az anyagok ezen a hőmérsékleten vagy minimálisan is e felett történő tárolásakor az *öngyulladásuk* bekövetkezése beavatkozás nélkül valóban *várható*.

3. táblázat: Adott méretű terménytárolókban tárolt anyagokhoz tartozó kritikus hőmérsékletek számított értékei

r^* (m)	T_{kr} (K)
Pelletált CGF	
5,0	295,28

* átlagos terménytároló méret (KSH nyomán)
Forrás: a szerzők szerkesztése

4.2.4. A kritikus tárolási méret meghatározása

Az elméleti kritikus mérethez tartozó élfelező hosszának értékeit a (6) alapképlet rendezésével nyert egyenlet segítségével határoztuk meg:

$$r = \sqrt{\frac{kRT_k^2 \delta_{kr} e^{\frac{E}{RT_k}}}{E \Delta H_f A \rho}} \quad (14)$$

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 adatainak³⁷ átlagaként adódott.

³⁶ Guo (2013): i. m.

³⁷ Lásd: www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/homersekketi_szeloertekek/Magyarorszag/index.php?ful=7#aktp

A számítás folyamatában meghatározásra került a Rayleigh-szám (15) egyenlet³⁸ szerinti kalkulált értékének felhasználásával:

$$Ra = \frac{g}{\nu a} D^3 \frac{RT_{kr}}{E} \quad (15)$$

ahol:

g – a gravitációs gyorsulás, (m/s²);

ν – a levegő kinematikai viszkozitása T_{kr} hőmérsékleten, (m²/s);

a – a levegő hőmérséklet-vezetési tényezője T_{kr} hőmérsékleten, (m²/s);

D – a vizsgált gabonataroló 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 (16) egyenlet:³⁹

$$\frac{g}{\nu a} = 1,2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{kr}}} \quad (16)$$

Az így kapott érték segítségével számítható a hőátadási együttható (α) a (16) egyenlet nagyságrendileg megfelelő változatába történő behelyettesítéssel:

$$\alpha = 0,54Ra^{0,25} \frac{k_{lev}}{D} + 4\sigma T_{kr}^3 \leftarrow Ra \leq 2 \cdot 10^7 < Ra \rightarrow \alpha = 0,135Ra^{0,33} \frac{k_{lev}}{D} + 4\sigma T_{kr}^3 \quad (17)$$

ahol:

σ – a Boltzmann-állandó, (W/m²·K⁴);

k_{lev} – a levegő hővezetési tényezője⁴⁰ (W/m·K).

α értékének ismeretében a (17) egyenlet felhasználásával kiszámítjuk a Biot-számot:

$$Bi = \frac{\alpha r}{k} \quad (18)$$

Majd azt behelyettesítve a (18) képletbe⁴¹ meghatározzuk az anyag levegővel való hőcseréjének intenzitását jellemző értéket:

$$\varphi(Bi) = \frac{Bi}{2} \left(\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi \right) \cdot e^{\frac{\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi - 2}{Bi}} \quad (19)$$

³⁸ Ю. Н. Шебеко et al.: *Методика определения условий теплового самовозгорания веществ и материалов*. Москва, 2004. 6. (1).

³⁹ Шебеко (2004): i. m. 7. (2)

⁴⁰ Шебеко (2004): i. m. 7. (5), ($k_{lev} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot T_{kr}$)

⁴¹ Persson (2013): i. m. 8.

Ezt követően az adott anyagban lezajló oxidációs reakciókat jellemző γ^{42} és β^{43} tényezőket határozzuk meg, amelyek matematikailag a (20) és (21) képletekkel fejezhetők ki:

Kiszámításukhoz a CGF-pellet anyag esetében a laboratóriumi kísérletek nyomán kapott (9) egyenlet szolgált alapul, hisz jól látható módon azok matematikailag a Frank-Kamenyec-kij-paraméterben benne foglaltatnak.

Ezt követően a (22) egyenlet alkalmazásával számítjuk a kritikus Frank-Kamenyec-kij-paramétert:

$$\gamma = \frac{cRT_{kr}^2}{E\Delta H_g} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{RT_{kr}}{E} \quad (21)$$

ahol:

δ_o – Az 1. táblázatban a kockához tartozó kritikus paraméter.

Ennek értéket behelyettesítve a (14) egyenletbe első közelítésben megkapjuk kritikus élfelező értékeit. Ezt követően újraszámítva a Rayleigh-számot, amelynek felhasználásával az előbbiekben ismertettek szerinti sorrendben kiszámítjuk ismételt r_{kr} új értékét. Ezt mindaddig végezzük, míg az előzőleg kapott értékhez viszonyítva a különbség 5% alá nem esik. Az így kapott végleges kritikus élfelező értékek a 4. táblázatban találhatók.

4. táblázat: Terménytároló elméleti kritikus méretének meghatározása a laboratóriumi vizsgálati eredményeinek tükrében

Meghatározás számítási paraméterei									
r_{kr} (m)	T_k^* (K)	R_a (10 ¹⁰)	α	Bi	ϕ (Bi)	β	γ	δ_{kr}	k_{lev}
Pelletált CGF									
2,28	311,9	6,2567	6,8816	224,26	0,9911	0,0324	0,00087	2,6353	0,02697

* júl. max. átl. hőmérséklet (OMSZ)⁴⁴

Forrás: a szerzők szerkesztése

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 tényezői, és természetesen a környezeti hőmérséklet. Amennyiben a megfelelő

⁴² Az anyag kiegészítést jellemző paraméter.

⁴³ Az oxidációs reakciót jellemző paraméter.

⁴⁴ Lásd: www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/homersekleti_szeloertekek/Magyarorszag/index.php?ful=7#aktp

hosszúságú indukciós időtartam⁴⁵ telik el a felhasználásig az anyag kitárolását megelőzően, bekövetkezhet az öngyulladás.

5. táblázat: Vizsgált anyagok számításokban alkalmazott anyagi állandói

Ömlesztett sűrűség ρ^{46} kg/m ³	Fajhő c J/(kg × K)	Hővezetési tényező k W/(m × K)	Égéshő ΔH_e^{47} MJ/kg	Aktiválási energia E^{48} J/mól
Pelletált CGF				
656,64	1600 ⁴⁹	0,07 ⁵⁰	18,6 ⁵¹	79809,41

Forrás: a szerzők szerkesztése

A kritikus állapotok esetén az öngyulladásai idő (s) meghatározására a (23) egyenlet alkalmazható:

$$\tau_{gy} = \frac{\tau c R T_0}{A E \Delta H_e} e^{\frac{E}{R T_0}} \quad (23)$$

ahol: τ_{gy} – a gyulladási idő⁵²

τ – a dimenzió nélküli indukciós idő.⁵³

Az egyenlet szerinti indukciós idő kiszámításához első lépésben a kísérleti úton kapott (9) egyenlet felhasználásával meg kell határozni az adott anyag vizsgált tárolási hőmérsékleten vett és a kritikus hőmérsékletéhez tartozó (2,52) F-K-paraméterek Δ -val jelölt, az öngyulladásai határtól való relatív eltérését:

$$\Delta = \frac{\delta_{kr}}{\delta_o} \quad (24)$$

Valamint szükséges a kockaformához tartozó alak tényező meghatározása:

$$j = 3\sigma - 1 \quad (25)$$

⁴⁵ A termikus indukció alatt azt az időtartamot értjük, amely alatt a hő akkumulálódása gyulladáshoz vezet. В. И. Курдюмов et al.: *Тепловая обработка зерна в установках контактного типа*. Ульяновск, Министерство Сельского Хозяйства Российской Федерации, 2013. 25.

⁴⁶ Nagy (2015a): i. m.

⁴⁷ Valérie Bontems et al.: The INRAE-CIRAD-AFZ tables, <https://www.feedtables.com/> vonatkozó adatbázisából.

⁴⁸ Bontems et al.: i. m.

⁴⁹ US Grains Council (2012): i. m. 14. oldal 10. táblázat vonatkozó adatainak felhasználásával számított érték.

⁵⁰ US Grains Council (2012): i. m. 14.

⁵¹ Cereal grains, Maize, extruded, Main constituents, Gross energy (MJ).

⁵² A rendszer hővesztés nélkül bekövetkező meggyulladásáig terjedő időtartam. Nason (2017): i. m.

⁵³ Шебеко et al. (2004) i. m.

A képletben szereplő σ a Frank-Kamenyeczij és Szemjonov gömb-ekvivalensek sugarainak arányát kifejező érték. Számítására a következő egyenlet szolgál:

$$\sigma = \frac{R_o^2}{R_{sz}^2} \quad (26)$$

ahol:

R_o^2 – a Frank-Kamenyeczij-gömb-ekvivalens sugara,

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

Előző meghatározása az „r” jellemző mérettel rendelkező tároló és a Frank-Kamenyeczij-gömb-ekvivalensek sugarainak arányát kifejező egyenlet⁵⁴ számított értékének segítségével történt:

$$\frac{r^2}{R_o^2} = \frac{2}{3\pi} \left[2 \arctg \left(\frac{p}{\sqrt{2+p^2}} \right) + \frac{1}{p^2} \arctg \left(\frac{1}{p\sqrt{2+p^2}} \right) + \frac{\sqrt{2+p^2}}{p} \right] \quad (27)$$

ahol:

p – a kocka esetében az egyenlő oldalárányok miatt 1-nek⁵⁵ adódik.

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

$$R_{sz} = 3V/S \quad (28)$$

ahol:

V – a tároló térfogata,

S – a tároló felszíne.

A fentiekben számított értékek, valamint a (20), (21) képletek adott hőmérsékleti értékre vonatkoztatott értékeit alábbi függvényekbe behelyettesítve:

$$f_1(\Delta, \gamma) = 1 + 0,62 \frac{1 - 4\Delta^{-2}\sqrt{\gamma}}{(\Delta - 0,95)^{0,9}} \quad (29)$$

$$f_2(j, Bi, \Delta) = 1 - \frac{[1 + 1,5(1 - 0,1\Delta)j]Bi}{16(1 + Bi)} \quad (30)$$

meghatározzuk a (31) egyenletben szereplő, dimenzió nélküli (τ) indukciós idő értékét az alábbiak szerinti számítással:

Ennek a (23) egyenletbe történő behelyettesítésével (τ_{gy}) indukciós időkre kapjuk a 6. táblázatban szereplő értékeket.

A kiértékelést és a bemutatott számításokat elvégezve a nyári átlagos (23,0 °C)⁵⁶ környezeti hőmérsékletre, valamint az előző siló méretarányainak megfelelő 10 m-es élhossz választva, az öngyulladásai időtartamok az alábbiak szerint alakultak:

$$\tau = f_1(\Delta, \gamma) f_2(j, Bi, \Delta) (1 + 2\beta) \quad (31)$$

⁵⁴ Шебеко et al. (2004) i. m. 26.

⁵⁵ Értéke 26. o. (П 11)-ben megadott oldalárányok viszonyából származtatva. Шебеко et al. (2004) i. m.

⁵⁶ Lásd: www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/homersekketi_szeloertekek/Magyarorszag/index.php?ful=7#aktp

6. táblázat: Adott méretű terménytárolókban tárolt anyagokhoz tartozó kritikus hőmérsékletek számított értékei

τ_{gy} (d)	T_o (K)	τ_{kr} (d)	T_{kr} (K)
Pelletált CGF			
172,1	296,15	30,8	295,28

*kritikus méret és magyarországi nyári hőhullámok maximális hőmérsékleteinek átlaga mellett

Forrás: a szerzők szerkesztése

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

Például a CGF-pellet szállítása esetén az önmelegedési folyamat optimális aktivitási szintjét 35–40 °C hőmérsékletre teszik. Ez egy olyan hőmérséklet, amelyet a nagy tömegben felhalmozott rakományon belül könnyen el lehet érni. A szállítási hőmérsékletnek 5 és 25 °C között kell lennie.⁵⁷

Ezzel egybecsengenek az 5. táblázat utolsó sorában kiemelt adatok. Hisz előbbi kalkulált hosszú periódus idejének értéke 23 °C, míg a viszonylag rövid indukciós periódusa pedig 38 °C mellett adódott.

5. Összegzés

A mezőgazdaságban termesztett növények egész évi ellátást biztosító mennyiségének előállítására főként a természetes vegetációs időszakában történik. A későbbi felhasználásra nagy tömegben megtermelt takarmányokat a már az előzőekben többször említett nagy befogadóképességű terménytárolókban helyezik el. Az elhúzó ütemű fogyasztás miatti hosszú idejű tárolás azonban jelentősen növeli az öngyulladás veszélyét. Az általam elvégzendő laboratóriumi vizsgálatok e veszély megítélésében szolgáltathatnak alapot a kiválasztott anyagokhoz.

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

Az e cikkben ismertetett anyagok elsődleges vizsgálataival nyert eredmények segítségével a tűzvédelmi gyakorlatban hasznosítható eredményekre vezettek a kutatás nyomán feltárt paraméterek, amelyek különösen fontosakká válnak az elkövetkező években. 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, amelyek mennyiségi oldalról igényelnek fokozott figyelmet a tűzvédelem tekintetében. Másfelől az itt felvonultatott módszertan segítségével kinyerhető adatokra támaszkodva megállapítható, hogy az éghajlatváltozás hozta átlaghőmérsékletek növekedése, valamint a magyarországi klimatikus viszonyok változásai

⁵⁷ Transport Information Service from the German Insurance Association: *Cargo loss prevention information from German marine insurers. Corn pellets*. TIS, (é. n.).

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 nyelvezetére, hogy a vizsgálatok segítségével előállított eredmények egyértelműen értelmezhetőek legyenek termelők, gazdák és a gyakorlati tűzvédelmi szakemberek számára. Ennek szándéka húzódik meg az itt bemutatottak mögött is.

Felhasznált irodalom

- Beda L.– Kerekes Zs.: *Égés- és oltáselmélet II.* Jegyzet. Budapest, Szent István Egyetem, 2006.
- Bhadra, Rumela – Kurt A. Rosentrater – Kasi Muthukumarappan: *Surface Characteristics and Flowability of Distillers Dried Grains with Solubles*. Paper No. 083811, 2008. Online: <https://doi.org/10.13031/2013.25024>
- Blomqvist, P. – Henry Persson – P. V. Hees – G. Holmstedt – U. Goransson – L. Wadso – M. Sanati – K. Rupar-Gadd: *An Experimental Study of Spontaneous Ignition in Storages of Wood Pellets*. Fire and Materials Conference, San Francisco, USA, 2007.
- Cubero-Abarca, Robert – Roger Moya – Jorre Valaret – Mario T. Filho: Use of Coffee (*Coffea arabica*) Pulp for the Production of Briquettes and Pellets for Heat Generation. *Ciência e Agrotecnologia*, 38. (2014), 5. 461–470. Online: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000500005>
- Eurostat: *Energy, Transport and Environment Statistics 2020 edition*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. Online: <https://doi.org/10.2785/522192>
- Франк-Каменецкий, Д. А.: *Диффузия и теплопередача в химической кинетике*. Москва, Академия Наук Союза ССР, Институт Химической Физики, 1947. Online: <http://books.e-heritage.ru/book/10080798>
- Gray, Brian F.: Spontaneous Combustion and Self-Heating. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Greenbelt, MD, 2016. 604–632. Online: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_20
- Guo, Wendi: *Self-Heating and Spontaneous Combustion of Wood Pellets during Storage*. Doctor of Philosophy in Chemical and Biological Engineering. Vancouver, The University of British Columbia, 2013.
- Hogland, William – Marcia Marques: Physical, Biological and Chemical Processes during Storage and Spontaneous Combustion of Waste Fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 40. (2003), 1. 53–69. Online: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00025-9)
- Instruction Manual Heraeus T5042E oven. Gemini BV Laboratory, 1994. Online: www.geminibv.com/labware/heraeus-t5042e-oven-2/
- Химическая Энциклопедия*. в пяти томах, Издательства «Большая Российская Энциклопедия». Москва, 1995.
- Курдюмов, В. И.– А. А. Павлушин – Г. В. Карпенко – С. А. Сутягин: *Тепловая обработка зерна в установках контактного типа*. Ульяновск, Министерство Сельского Хозяйства Российской Федерации, 2013. Online: [Тепловая-обработка-зерна-в-установках-контактного-типа_Монография-1.pdf \(bjd-ugsha.ru\)](http://www.bjd-ugsha.ru/monografia-1.pdf)
- Korpejan, Jaap – Anders Lönnemark – Henry Persson – Ida Larsson – Per Blomqvist – Mehrdad Arshadi – Elizabeth Valencia-Reyes – Staffan Melin – Pat Howes – Patrick Wheeler – David Baxter: *Health and Safety Aspects of Solid Biomass Storage, Transportation and Feeding*. IEA Bioenergy, 2013.

- Kutz, Myer (szerk.): *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*. New York, Elsevier, 2015.
- Maximize Market Research: *Global Ethanol Market – Industry Analysis and Forecast (2020–2027) – by Feedstock Type, End User, and Region* (é. n.). Online: www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-ethanol-market/25241/
- Nason, James: Livestock a Much Smaller Challenge to Global Food Security than Often Reported. *Beef-Central.com*, 2017. szeptember 22. Online: www.beefcentral.com/news/livestock-a-much-smaller-challenge-to-global-food-security-than-often-reported/
- Nagy Rudolf: *A növényi anyagok öngyulladásának laboratóriumi vizsgálata*. Szakdolgozat. Ybl Miklós Építéstudományi Kar Tűz- és Katasztrófavédelmi Intézet, 2015a.
- Nagy Rudolf: Növényi anyagok öngyulladásának vizsgálata. In Kovács Tibor (szerk.): *Biztonságtechnikai Szimpózium a Magyar Tudomány Ünnepe 2015 keretében*. Budapest, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 2015b. 1–13.
- Nagy Rudolf – Földi László: A kritikus infrastruktúrák és védelmük nemzeti programja. *Polgári Védelmi Szemle*, 2. (2009), 1. 57–71.
- NFPA 499: *Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas*. 2013 Edition
- Nordtest: *Guidelines for storing and handling of solid biofuels*. NT ENVIR 010. Oslo, Norway, Nordic Innovation Centre, (2008).
- Nordtest: *Solid Materials: Spontaneous Ignition Temperature By Continuous Heating (NT Fire 045)* (1992. szeptember 14.). Online: www.nordtest.info/wp/1992/09/14/solid-materials-spontaneous-ignition-temperature-by-continuous-heating-nt-fire-045/
- Persson, Henry: *Silo Fires Fire Extinguishing and Preventive and Preparatory Measures*. Karlstad, Swedish Civil Contingencies Agency (MSB), 2013.
- Restuccia, Francesco – Nieves Fernández-Áñez – Guillermo Rein: Experimental Measurement of Particle Size Effects on the Self-Heating Ignition of Biomass Piles: Homogeneous Samples of Dust and Pellets. *Fuel*, 256. (2019). 115838. Online: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115838>
- Rosenrater, Kurt. A. – Elif Kongar: *Costs of Pelleting to Enhance the Logistics of Distillers' Grains Shipping*. ASABE Paper No. BIO-097992. Seattle, 2009. Online: <https://doi.org/10.13031/2013.28871>
- Safety investigation into the self-combustion of wood pellets in cargo hold no. 5 on board the Maltese registered bulk carrier V DUE At Point Lynas Anchorage, Liverpool, on 29 November 2016*. Marine Safety Investigation Report, 2017.
- Шебеко, Ю. Н. – В. И. Горшков – И. А. Корольченко – А. С. Кухтин – В. Л. Крылов: *Методика определения условий теплового самовозгорания веществ и материалов*. Москва, МЧС России, 2004. Online: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293819/4293819617.pdf>
- Stelte, Wolfgang: *Guideline: Storage and Handling of Wood Pellets*. Resultat Kontrakt (RK) Report. Taastrup, Denmark, Danish Technological Institute, Energy and Climate, Centre for Renewable Energy and Transport, Section for Biomass, 2012.
- Transport Information Service from the German Insurance Association: *Cargo loss prevention information from German marine insurers. Corn pellets*. TIS, (é. n.). Online: www.tis-gdv.de/tis_e/ware/futter/pellets/mais/mais-htm/
- U.S. Grains Council: *A Guide to Distiller's Dried Grains with Solubles* (2012). Online: <https://grains.org/wp-content/uploads/2018/01/Complete-2012-DDGS-Handbook.pdf>
- Valérie Bontems et al.: The INRAE-CIRAD-AFZ tables. Cereal grains, Maize, extruded, Main constituents, Gross energy (MJ). Online: www.feedtables.com/
- Zion Market Research: *Gluten Feed Market By Source (Wheat, Corn, Barley, Rye, And Others) And By Livestock (Swine, Poultry, Cattle, Aquaculture, And Others): Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis, And Forecast, 2018–2026*. (2019. április 27.). Online: www.zionmarketresearch.com/report/gluten-feed-market