

SZAKDOLGOZAT

OE-YBL
2024.

Hallgató neve:
Hallgató törzskönyvi száma:

Gábor Szabolcs





ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Ybl Miklós Építéstudományi Kar
Építőmérnöki Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Gábor Szabolcs

Szakedolgozat száma: [REDACTED]

Törzskönyvi száma: [REDACTED]

Neptun kódja: [REDACTED]

Szak: Tűzvédelmi szakmérnök

Specializáció:

A dolgozat címe: A szalma, mint építőanyag égéskésleltetési lehetőségei

A dolgozat címe angolul: Fire retardant possibilities of straw as construction material

A feladat részletezése: A szalma, mint építő elem vizsgálata a jellemző alkalmazások tűzvédelmi vonatkozásában. Különböző égéskésleltető anyagok alkalmazásának lehetőségei és eredményei. A különböző égéskésleltető anyagokkal elérhető tűzvédelmi teljesítmény összehasonlítása, elemzése

Intézményi konzulens neve: Lucza Edit Éva

Külső konzulens neve: Dr. Kerekes Zsuzsanna

Munkahelye: Nemzeti Közszolgálati Egyetem

A kiadott téma elévülési határideje: 2028. 12. 31.

Beadási határidő: 2024. 05. 15.

A szakedolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2024. 03. 06.

Óbudai Egyetem
Ybl Miklós Építéstudományi Kar
Építőmérnöki Intézet
1446 Budapest, Thököly út 74.
1442 Budapest, 70., Pf. 117.

[Signature]
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2024. 05. 15.

[Signature]
belső konzulens

[Signature]
külső konzulens

SZAKDOLGOZAT
KONZULTÁCIÓS NAPLÓ

Hallgató neve: Gábor Szabolcs

Dolgozat száma: [REDACTED]

Oktatási azonosítója: [REDACTED]

Szak, specializáció megnevezése:

Neptun azonosítója: [REDACTED]

Tűzvédelmi szakmérnök

Törzskönyvi száma: [REDACTED]

A dolgozat címe magyar nyelven: Szalma, mint építőanyag égeszkíslethez lehetséges

A dolgozat címe angol nyelven: Fire retardant possibilities of straw as construction material

Belső (kari) konzulens neve: Lucza Edit Éva

Külső konzulens neve: Kerkes Zsuzsanna

Külső konzulens munkahelye: Nemzeti Közszolgálati Egyetem

ALK.	DÁTUM	KONZULTÁCIÓ TÉMÁJA, TARTALMA	KONZULENS ALÁÍRÁSA
1.	2023.10.17.	Témaindító	Kerkes
2.	2024.04.19.	Témaindító	Kerkes
3.	2024.03.13.	Labor	Kerkes
4.	2024.04.11.	Labor	Kerkes
5.	2024.05.10.	70%-os konzultáció	Kerkes
6.	2024.05.13.	Leadás előtti konzultáció	Kerkes
7.	2024.05.15.	Leadás előtti konzultáció	Kerkes

A Konzultációs naplót minimum négy alkalommal az egyes konzultációk alkalmával kell láttamoztatni bármelyik konzulenssel.

A részvételt a konzulens akkor igazolhatja, ha arra a hallgató felkészülten érkezik, azaz érdemi konzultáció történt.

A hallgató a Szakdolgozat/Diplomatervezés/Diplomamunka tantárgy(ak) követelményét teljesítette.

Kelt: Bp., (hely), 2024.05.15. (dátum)

belső (kari) konzulens

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott Gábor Szabolcs hallgató kijelentem, hogy a dolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült dolgozatban található eredményeket az Óbudai Egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Kelt: Siófok, 2024.05.15.



hallgató

SZALMA, MINT ÉPÍTŐANYAG ÉGÉSKÉSLELTETÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

Szakdolgozatomban a szalma építőipari felhasználásnak lehetőségeit vizsgálom tűzvédelmi szempontból. A szalma kiváló hőszigetelő tulajdonságokkal rendelkezik, nagy számban rendelkezésre álló természetes építőanyag, azonban a köztudatban rossz a megítélése a könnyű éghetősége miatt. Az éghetősége azonban remekül javítható tömörítéssel, vakolással, égéskésleltetéssel. A szalma égéskésleltetésének témájában több tanulmány is született, számos szakirodalmi cikk foglalkozik ennek vizsgálatával. Ezen cikkek rendre a nyílt láng hatását vizsgálják, a sugárzó hő okozta következményeket nem. A sugárzó hő hatásait azonban rendkívül fontos megismerni, hiszen a láng megjelenése előtt mindig sugárzó hőnek van kitéve az anyag. A jelenség elemzése céljából többféle égéskésleltetővel kezelt szalma próbatesten végeznek méréseket, melyeket 650 °C hőmérsékletű sugárzó hőforrásnak fogom kitenni. Állandó és változó távolságú sugárzó hővel szembeni viselkedést is vizsgálni fogom és az így kapott értékek kielemezése után fogok következtetéseket levonni az égéskésleltetés és az alkalmazott kezelési módszerek hatásosságát illetően.

Kulcsszavak: szalma, égéskésleltetés, tűzvédelem, hőszigetelés, sugárzó hő

FIRE RETARDANT POSSIBILITIES OF STRAW AS CONSTRUCTION MATERIAL

In my thesis I am going to study the possible usage of straw in construction industry in terms of fire safety. Straw has excellent insulation properties, available in huge quantity and also natural material, however has a quite bad reputation due to its flammability. The flammability nevertheless can be fixed by compression, plastering and use of fire retardant. A lot of studies can be found in the topic of fire retardant possibilities of straw. These studies mostly investigate the reaction to direct action of the flame, but not the reaction to heat radiation. It is however very important to understand the reaction to heat radiation since it always happens before direct flame. I will make several tests using different type of fire retardants to analyse the reaction of straw to 650 °C heat radiation. Tests will be carried out from constant distance and from changing distance and after all these tests I will analyse the results and I will make an engineering judgement if the fire retardants and the treatment procedure were successful.

Keywords: straw, fire retardant, firestop, insulation, heat radiation

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS.....	7
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	9
2.1. A SZALMA ÉPÍTŐIPARI FELHASZNÁLÁSA.....	9
2.2. SZALMA, MINT ALAPANYAG TŰZVÉDELMI TULAJDONSÁGAI	11
2.3. SZALMA FELÉPÍTÉSE	13
2.4. A CELLULÓZ TERMIKUS BOMLÁSA	14
2.5. TERMOANALITIKAI MÓDSZEREK	15
2.6. CELLULÓZRA ALKALMAZOTT ÉGÉSKÉSLELTETŐ ANYAGOK, ELJÁRÁSOK	18
2.6.1 Szalma égéskésleltetése mész és gipsz hozzáadásával.....	18
2.6.2. Tűzálló kukorica szalma téglá. Termikus stabilitás, éghetőség és égéskésleltetés .	22
2.6.3. Rizsszalma kezelés metil-metakriláttal	27
3. PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA.....	29
4. VIZSGÁLATOK.....	30
4.1. VIZSGÁLATI MINTÁK.....	30
4.2. VIZSGÁLATI MÓDSZER	31
4.3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK.....	33
4.3.1 Állandó távolságú sugárzó hő – kezeletlen minta.....	33
4.3.2. Állandó távolságú sugárzó hő – kezelt minták.....	34
4.3.3. Változó távolságú sugárzó hő – kezelt minták.....	40
4.3.4. Összefoglaló táblázat.....	47
5. KÖVETKEZTETÉS ÉS MÉRNÖKI JAVASLATOK	49
6. HIVATKOZÁSOK	51

1. BEVEZETÉS

Korunk legnagyobb kihívása a klímaváltozásnak az emberi társadalomra, illetve a bolygónkra gyakorolt hatásainak mérséklése, lehetőség szerinti megszüntetése. E kihívással kapcsolatban a legmagasabb szinteken is elvárásokat fogalmaztak meg a döntéshozók, így az Európai Unió is kidolgozott egy programot, melynek végső célja, hogy az egész unió 2050-re teljesen klímasemlegessé váljon. A klímasemlegesség azt jelenti, hogy a légkörbe csak annyi üvegházhatású gáz kerül, amennyit a természet – azaz az erdők, az óceánok és a talaj – el tud nyelni. Ezt nevezzük a nettó nulla kibocsátás egyensúlyi állapotának.

[<https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/climate-change/> , letöltés: 2024.03.07. 19.25]

Ezen ambiciózus célok elérése érdekében az építőipar tekintetében is számos lépést kell tenni, hiszen az építőipar hagyományosan az egyik legszennyezőbb iparágnak számít. A felhasználásra kerülő alapanyagoknak nem csupán a gyártása, de a szállítása, beépítése, majd a bontás utáni hulladékként való megsemmisítése is rendkívül megterheli a környezetet.

Számos tanulmány foglalkozik az építőipar fenntarthatóságával és egyre nagyobb figyelmet kapnak az öko építészeti megoldások. Ilyen megoldás például a fa alapanyagú készházak építkezése, mely a skandináv államokban már igen elterjedt. Az épületek favázában kiválóan alkalmazható hőszigetelő, vázkitöltő anyagként a szalma, mely természetes alapanyag és Magyarországon is nagy mennyiségben rendelkezésre áll, így az előállítása és a szállítása során nagy mértékben csökkenthetők a karbon kibocsátási együtthatók.

A szalma építőipari felhasználása több ezer éves hagyománnyal rendelkezik. Napjainkban is számos építési projekten használnak szalmát külföldön és Magyarországon egyaránt. A szalma kiváló épületfizikai tulajdonságai vannak és minden évben nagy mennyiségben kerül előállításra a mezőgazdaság melléktermékeként, így kifejezetten környezetbarát építőanyag.

A szalma definíció szerint, a jellemzően szemtermésükért (pl.: búza, kukorica, árpa, zab stb.) termesztett növények, vagy másnéven gabonafélék betakarítása (cséplése) után megmaradt, kiszáradt szár és szárrészek gyűjtőneve. Cellulóz alapú anyag, mint a természetben előforduló növények nagy része. Szerkezetét tekintve így módon tehát hasonló számos, az építőiparban elterjedt anyaghoz, mint pl.: fa, cellulóz szigetelés (újrahasznosított papírhulladék), OSB stb.

A magyar jogszabályok szerint a szalma F tűzvédelmi osztályú anyag, melynek a tűzzel szembeni viselkedése nem meghatározott. Ez nagyrészt annak tudható be, hogy igen sokféle szalma fordul elő a természetben és a tulajdonságaik nagyon szórnak, ezért nehéz egységes jellemzést adni a szalmáról.

Dolgozatomban célul tűzöm ki a szalma tűzzel szembeni viselkedésének megismerését, égéskésleltetésének lehetőségeit.

Számos szabványos eljárás létezik a közvetlen lángnak való ellenállás vizsgálatára, valamint több tanulmány is született a szalma éghetősége, égéskésleltetése kapcsán. Ezzel szemben sugárzó hővel szembeni viselkedésre sem szabványos vizsgálati eljárás, sem tanulmány nemigen létezik, pedig fontos jelenség, hiszen a lángot, tüzet mindig hő előzi meg, továbbá a termikus bomlás már 150-200° C-on beindul, jóval a gyulladáspont alatt. Diplomamunkám során egy egyedi készítésű hősugárzó készülékkel fogom vizsgálni a szalmát. Többféle vizsgálati módszert is ki fogok próbálni annak érdekében, hogy a szalma sugárzó hővel szembeni reakcióját minél alaposabban megismerjem és a vizsgálatok eredményeinek tükrében a lehető legmegfelelőbb következtetést tudjam levonni a szalma építőipari alkalmazhatóságáról. Végül javaslatokat fogok megfogalmazni a feldolgozott irodalom és a kísérleti eredményeim alapján arra vonatkozólag, hogy érdemes-e a szalma tűzvédelmi megfeleltetésével hivatalosan is foglalkozni.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalomban számos példát találunk a szalma felhasználásával kapcsolatos problémák megoldásaira, illetve az ezekkel kapcsolatos kísérleti anyagokra. Mind a hazai, mind a nemzetközi irodalom bővelkedik a szalmát alkotó cellulóz termikus bomlását leíró tanulmányokban, égéskésleltetők használatának hatásait bemutató kísérletekben. Az alábbiakban ezekből fogok a teljesség igénye nélkül feldolgozni néhány olyan munkát, mely közvetlenül kapcsolódik diplomamunkám tárgyához.

2.1. A szalma építőipari felhasználása

A szalma megújuló alapanyag. Létrejöttéhez csak napenergiára, vízre, levegőre és a földben lévő ásványi anyagokra van szükség. A szalma anyaga cellulózból, ligninből és kovaföldből áll, felületét viaszszerű anyag borítja, mely víztaszító hatású. A szalmaszálak szilikáttartalmuk miatt nehezen bomlanak le, nehezen rothadnak el, ezért előszeretettel használják biogazdaságokban talajlazításra, vagy istállókban alomként.

Magyarországon és Európa szerte évszázadok óta készítenek szalmatető házakat, bár meg kell jegyezni, hogy a nád a legalkalmasabb erre a célra a tartóssága miatt. A szalmát évezredek óta használják a vályogépítés adalékanyagaként is. A szalma a vályoghoz keverve emeli a falazat hőszigetelő képességét, valamint csökkenti a száradáskor fellépő résképződést.

A gabonanövényeket jellemzően kombájnnal aratják. A kombájnok a növények magját leválasztják a száráról és a szárat különböző méretű bálába rendezik és préselik. A szalmabálák különböző méretűek lehetnek és hasáb vagy kör geometriát vehetnek fel. Építési célra a kishasáb- és nagyhasábbálázó gépekkel készített bálák felelnek meg, de a nagy körbálákat is át lehet hasáb alakúra préselni. A kishasábbálázó gépekkel a gyártók szerint 120 kg/m^3 térfogatsűrűségű bálák készíthetők, méreteik $36 \times 49 \times 50$ -tól 130 -ig változnak. G. MINKE, B. KRICK [2012] Szalmabála építés, Cser kiadó (p 19-24)

2006-ban Németországban a szalmabála-építés szakmai szövetsége általános építésfelügyeleti engedélyt szerzett a szalmára, így ott már felhasználható bizonyos építőipari alkalmazásokra.

A német építésfelügyeleti engedély alapján a szalma épületfizikai jellemzői az alábbiak:

- **Hővezetési tényező:**

- Szá irányban: $\lambda = 0,080 \text{ W/mK}$
- Szá irányra merőlegesen: $\lambda = 0,052 \text{ W/mK}$.

A hővezetési tényező azt fejezi ki, hogy mekkora hőáram halad át időegység alatt egységnyi vastagságú, az áramlásra merőlegesen egységnyi felülettel bíró anyagon, egységnyi hőmérsékletkülönbség hatására.

[<https://www.nordikal.hu/letolt/epuletfizika.pdf>], letöltés: 2024.03.20. 17.32]

Összehasonlításképpen néhány gyakorlatban használt hőszigetelő anyag hővezetési tényezője:

Üveggyapot hőszigetelés: $\lambda = 0,044 \text{ W/mK}$

Polisztirol hőszigetelés: $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$

Kőzetgyapot hőszigetelés: $\lambda = 0,036 \text{ W/mK}$;

[<https://kozetgyapotarak.hu/rockwool/szigeteloanyag-hoatbocsatasi-tenyezo/>], letöltés: 2024.03.20. 16.21]

Látható a fenti adatokból, hogy a szalma hőszigetelési tulajdonságai nagyban függenek a száliránytól. Szálirányra merőlegesen jobb a hőszigetelési tulajdonsága.

- **A páradiffúziós ellenállási tényező: $\mu = 2$.**

A páradiffúziós ellenállási tényező egy mértékegység nélküli viszonyszám, ami megadja, hogy milyen vastag anyag páradiffúziós ellenállása egyenlő 1m levegő ellenállásával. Néhány anyag páradiffúziós ellenállása: vasbeton: 25, kőzetgyapot 1,6, XPS: 100-200; EPS: 40-100.

A páratechnikai ökölszabály, hogy a rétegek páradiffúziós ellenállása belülről kifelé haladva legyen egyre kisebb, a szerkezet legyen „kifelé nyitott”.

[https://lakcimke.energiaklub.hu/sites/default/files/szigetelesi_megoldasok_knaufinsulation.pdf], letöltés: 2024.03.20. 19.33]

Az látszik, hogy a szalmának a kőzetgyapothoz hasonló páradiffúziós ellenállása van, tehát nem tekinthető kifejezetten párazáró anyagnak.

Tűzvédelmi tulajdonságai a német építésfelügyeleti engedély alapján:

- A DIN 4102 szabvány szerinti tűzveszélyességi osztály: B2, közepesen éghető – közepesen gyúlékony
- A DIN 4102 szabvány szerinti tűzveszélyességi osztály híg vályoggal 8mm bevont szalma bála esetén: B1, nehezen éghető – nehezen gyulladó
- Testsűrűség: 90-110 kg/m³
- A DIN 4102 szabvány szerinti tűzállóság:
 - Teherhordó szalmabála fal 3-5cm vályogvakolattal ellátva: F30
 - Nem teherhordó szalmabála fal 1 cm vályogvakolattal: F30

- Nem teherhordó szalmabála fal 3-5cm vályogvakolattal: F90

G. MINKE, B. KRICK [2012] Szalmabála építés, Cser kiadó (p 25-26)

Látható tehát, hogy a szalma akár teherhordó alkalmazásokra is használható, azonban a gyakorlatban leginkább hőszigetelésként kerül beépítésre. A szalmabála szigeteléssel elérhető akár a passzív ház minősítés is, mely esetben az adott épület éves fűtési energiaszükséglete kisebb, mint 15 kWh/m^2 . Szalma hőszigetelés használható egy-és kétszintes családi házon, ikerházon, sorházon, ipari, mezőgazdasági épületen, sőt kisebb iskolákon is.

Kétségtelen tény, hogy a kazalban álló szalma könnyen lángra kap és jól ég, azonban az osztrák ÖNORM 3800 szerinti vizsgálattal igazolták, hogy azok a szalmabálák, amelyeknek mind a két oldala vakolattal ellátott, képesek 90 percig is ellenállni a tűznek. A szalmabálák viszonylag jó tűzállósága annak köszönhető, hogy ha megfelelően össze vannak préselve, megfelelően nagy testsűrűséggel rendelkeznek, akkor a szerkezetben kevés levegő marad, továbbá a vakolat is meggátolja a levegő bejutását a szerkezetbe. A kasseli egyetemen kísérletet végeztek szalmabála falakon és azt tapasztalták, hogy amennyiben a vakolat megreped, akkor a repedés mögött a szalma elszenesedik és védőréteget képez a szerkezet belső rétegei számára. A vizsgálatuk során azt tapasztalták, hogy 1000°C -os hőmérsékleten 90 perc elteltével sem indult meg a szerkezet égése, csupán a repedéseknél volt tapasztalható szenesedés.

Építés közben azonban a szalmabála kifejezetten tűzveszélyes anyag, különösen, ha szalmaszála, tarlóok állnak ki a bálából, ezért beépítés után célszerű egyből felhordani az első vakolatréteget. G. MINKE, B. KRICK [2012] Szalmabála építés, Cser kiadó (p 28-44)

2.2. Szalma, mint alapanyag tűzvédelmi tulajdonságai

A szalma felhasználásával történő építés tűzvédelmi aspektusaival természetesen a hazai szakirodalom is foglalkozik. A szalma, mint építőanyag tűzvédelmi tulajdonságait taglalja Dr. Lublőy Éva, Móder István Ferenc és Dr. Takács Lajos Gábor cikke az Építőanyag című folyóiratban megjelent 2010. évi 4.számában.

A szalmán elvégzett eddigi vizsgálatok jellemzően kötött rétegrendre vonatkoznak, jellemzően a tűz felőli oldalon vakolattal rendelkező szalmára. A vakolatlan szalmabála sem európai sem hazai építési termékre vonatkozó megfelelőségi tanúsítvánnyal nem rendelkezik.

Magyarországon a szalma F tűzvédelmi osztályba tartozik, hiszen nem végezték el rajta az EN ISO 11925-2: 2020 (Tűzveszélyességi vizsgálatok. Építési célú termékek gyúlékonysága közvetlen lánghatás mellett. 2. rész: „Egyedi láng”-os vizsgálat) vizsgálatot.

Az Amerikai Egyesült Államokban a hivatalos eljárás az építőanyagok és termékek tűzállóságának minősítésére az ASTM E-119 jelű szabvány. A vizsgálatot elvégezték 1993-ban egy vakolatlan és egy mindkét oldalán kohósalak adalékanyagú, alumínátcement kötőanyagú vakolattal ellátott nem teherhordó szalmabála falon.

A vakolatlan bálafal a vizsgálat első 30 percében ellenállt a tűzhatásnak, az átlaghőmérséklet a tűzmentett oldalon csupán 11,6° C-kal emelkedett, sem láng, sem forró gáz nem jutott át a szerkezeten. A vizsgálat 34. percében azonban lángáttörést tapasztaltak.

A megfigyelések azt támasztották alá, hogy a bálafal külső, elszenesedett rétege elzárta az oxigén útját a belső rétegek felé, így lassította az égést.

A vakolt bálafal esetében a tűzmentett oldalon a vizsgálat 120 perce alatt az átlaghőmérséklet összesen 17,3 C-kal emelkedett, lángáttörés nem volt tapasztalható, gáz nem jutott át a szerkezeten.

A vizsgálatot elvégezték később 2006-ban is cement és agyag vakolatú nem teherhordó bálaszerkezeten. A vizsgálat után a cement vakolatú falszerkezet 120 perces tűzállósági határértéket, az agyag vakolatú 60 perces tűzállósági határértéket kapott.

Bécsben 2001-ben vizsgálták meg agyagtapasztású, nem teherhordó szalmabála falszerkezetet tűzzel szembeni viselkedésre az ÖNORM 3800-2 szabvány szerint. A szerkezet 90 perces tűzállósági határértéket kapott.

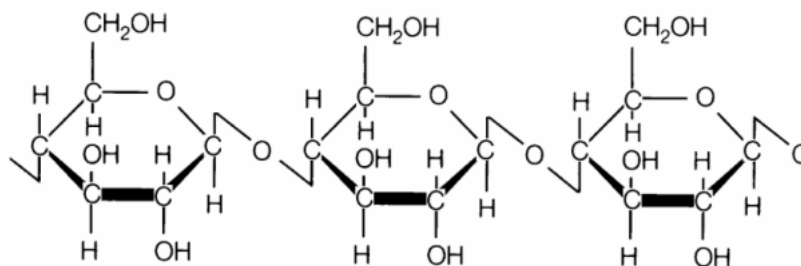
A szerzők saját kísérleteket is elvégeztek, amely során nem kötött rétegrendet, hanem a szalmát önmagában vizsgálták. Különböző testsűrűségű próbatesteket készítettek különböző kötőanyag alkalmazásával. Megállapításaik az alábbiak voltak:

- A kötőanyag alapvetően befolyásolja a szalmabála tűzzel szembeni ellenállóképességét. Ha a kötőanyag elég és így a szalmabála szerkezet fellazul, elegendő oxigén jut be a belsejébe és az égési folyamat végbemegy. Fontos szempont tehát, hogy a kötőanyag nem éghető anyagú, javaslatuk szerint horganyzott acél legyen.

- A szalmabálák tűzzel szembeni ellenállóképessége a testsűrűséggel egyenesen arányos. Mivel Magyarországon nincs az építésre szalmabálák tömörségére előírás, a kaliforniai szabvány 110 kg/m^3 -es értéke jó irányadó.
- Azon bálák, amelyek nagy testsűrűséggel rendelkeztek nem kaptak lángra, hanem elszenesedéssel reagáltak. A belső rétegeket a külső elszenesedett rétegek megvédik, az oxigén ne jut be, így pedig az égés sem megy végbe. Az elszenesedett réteg hőszigetel is egyben.
- A kiálló szálak gyorsan lángra kaptak, azonban ez nem jelentette a próbatest teljes átégését. LUBLÓY É., MÓDER I., TAKÁCS L. [2010] Szalmabála anyagú falak tűzvédelmi kérdései, Építőanyag folyóirat 2010/4. 62. évf. 4. szám

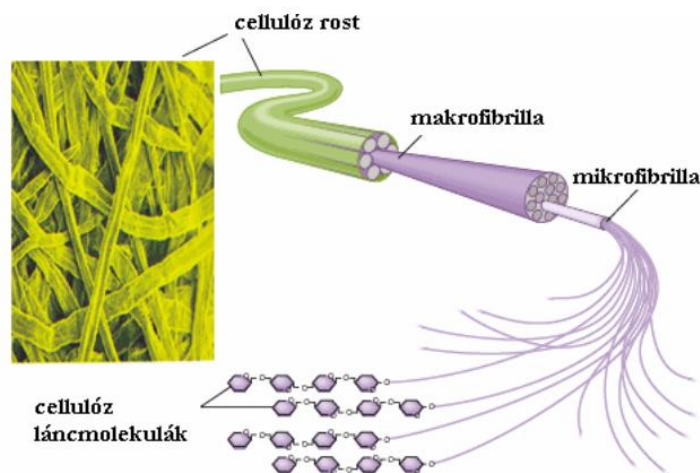
2.3. Szalma felépítése

A szalma vázanyagának az alapját a cellulóz adja. „A cellulózmolekula egyenesláncú polimermolekula, amely β -D-glükózból áll. Az alapegységek két glükózból β -1,4-es glikozidos kötéssel kapcsolódnak egymáshoz. A glükóz egységek egy oxigén atomon keresztül kapcsolódva cellobióz molekulát képeznek, ez lényegében a cellulóz monomer egysége.” KOLTAI L., [2009] Papíripari cellulózrostok kolloidkémiai szerkezetének vizsgálata, Doktori (Ph.D.) értekezés, NyME. (p. 21)



1. ábra - A cellulóz szerkezeti felépítése [KOLTAI L., 2009]

A cellobiózból β -1,4-es glikozidos kötéssel hosszú láncú cellulóz molekula képződik. A cellulózláncok összekapcsolódásával mikrofibrillák jönnek létre. A mikrofibrillák pedig makrofibrillákat alkotnak. [KOLTAI L., 2009]



2. ábra - A cellulózrost mikroszkopikus felépítése [KOLTAI L., 2009]

A cellulózrostok ipari szempontból legfontosabb jellemzői:

- A méret, vagyis a hosszúság
- Hosszúságeloszlás
- Szélesség, illetve átmérő
- Falvastagság

A rost származása	Pamutrost	Fenyőfa	Lombos fa	Búzaszalma
Átlagos rosttartalom (V%)	100	95	60	52
Rosthosszúság (μm)	20	3,5	1,1	1,1
Rostszélesség (μm)	25	35	22	15
Rostfal-vastagság (μm)	2	8	3	3

3. ábra - Jellemző cellulózrostok méretei [KOLTAI L., 2009]

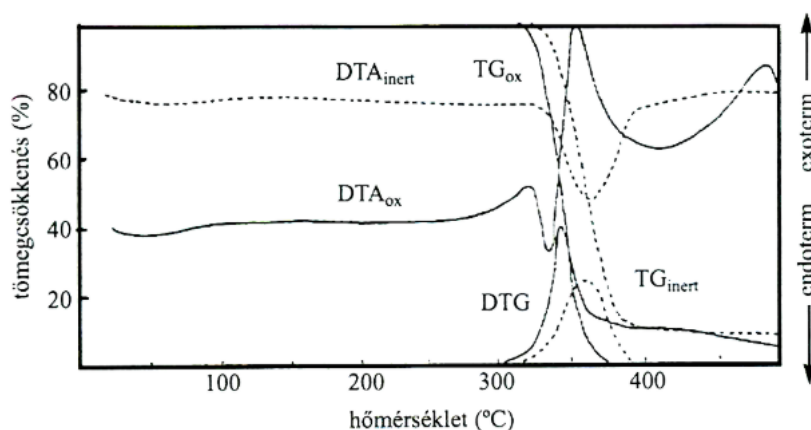
2.4. A cellulóz termikus bomlása

A cellulóz termikus bomlását széles körben tanulmányozták az elmúlt század során. Az alapvetően rendkívül összetett folyamatot természetesen különféle tényezők befolyásolják. Ilyen belső tényező a cellulóz jellege, kristályosságának mértéke, polimerizációs foka, tisztasága. Külső tényezők között lehet említeni a hőmérsékletet, környezeti atmoszférát, a nyomás és hőmérséklet-idő profilt. HORVÁTH N., [2008] A termikus kezelés hatása a faanyag tulajdonságaira, különös tekintettel a gombaállóságra, Doktori (Ph.D.) értekezés, NyME, (p. 17)

A megfigyelések alapján a cellulóz termikus bomlásának folyamata inert (nitrogén) atmoszférában 300°C -ig lassú, e hőmérséklet felett viszont a bomlás gyors. A gyors bomlás függően az adott körülményektől $300\text{--}320^{\circ}\text{C}$ -nál indul és közelítőleg 390°C -ig játszódik le teljes mértékben. Az inert atmoszférában lejátszódó bomlás folyamat endoterm, a végén mintegy 12-15% elszenesült termék marad vissza.

Levegőben a folyamat korábban indul és a nagy tömegcsökkenéssel járó termikus bomlási folyamat jelentősen exoterm. A bomlás sebességének maximuma is alacsonyabb hőmérsékleten következik be, jellemzően $320\text{--}350^{\circ}\text{C}$ -nál között. A degradáció oxidatív atmoszférában a maradék teljes oxidációjával fejeződik be általánosságban $410\text{--}500^{\circ}\text{C}$ közötti maximummal jelentkező exoterm lépésben. A visszamaradt anyag a hamutartalom. [HORVÁTH N., 2008]

Az alábbi ábra a cellulóz tömegcsökkenését (TG) és a lejátszódó folyamatok hőeffektusát (DTG) szemlélteti.



4. ábra - A cellulóz termikus bomlása [HORVÁTH N., 2008]

2.5. Termoanalitikai módszerek

A termikus analízis vizsgálati módszerei közé számos eljárás tartozik. A szakirodalmi kitekintések ezen módszerekkel végzett kísérletek eredményeit fogják tartalmazni, így a jobb érthetőség kedvéért egy előzetes összefoglalót kívánok nyújtani a módszerekből.

A különböző termoanalitikai módszerek sajátossága, hogy a vizsgálandó anyagból vett minta hőmérsékletét előre meghatározott program szerint növeljük, eközben az anyag valamely fizikai vagy kémiai sajátosságának változását mérjük. A legfontosabb módszereket az 1. táblázat foglalja össze.

[http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/anal/BSc-Analitikai-es-Szerkezetvizsgalati-Szaklabor/Termikus-analizis_jegyzet_1999.pdf; letöltés: 2024.05.01. 19.15]

1. táblázat - Termoanalitikai módszerek. Forrás:

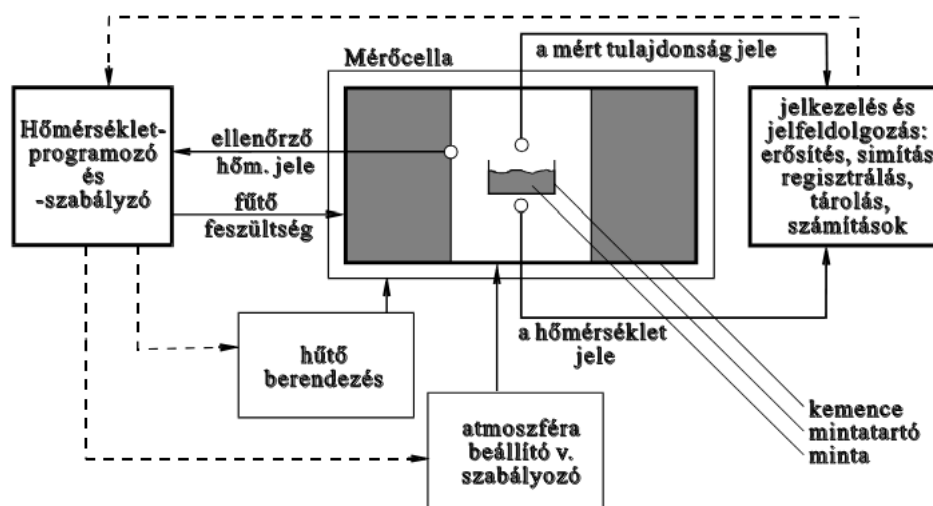
http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/anal/BSc-Analitikai-es-Szerkezetvizsgalati-Szaklabor/Termikus-analízis_jegyzet_1999.pdf, kereső: www.google.hu, kulcsszavak: termikus analízis, letöltés: 2024.05.01. 17.50

Vizsgált tulajdonság	Elnevezés	Rövidítés
tömeg	termogravimetria derivatív termogravimetria	TG DTG
felszabaduló gázok mennyisége	fejlődő gáz kimutatása fejlődő gáz analízise (evolved gas detection/analysis)	EGD EGA
entalpiaváltozás	differenciális termikus analízis differenciális pásztázó (scanning) kalorimetria	DTA DSC
méret	termodilatometria	TD
mechanikai tulajdonság	termomechanikai analízis dinamikus termomechanikai analízis	TMA DMA
mágneses/elektromos tulajdonság	termomagnetometria termoelektrometria	
külső megjelenés, optikai tulajdonságok	termomikroszkópia termooptometria	

A termoanalitikai méréseket háromféle célból lehet végezni:

1. A minta összetételének megállapítása.
2. A minta bizonyos fizikai, illetve kémiai paramétereinek meghatározása, vagy ilyen paraméterek hőmérsékletfüggésének leírása.
3. Fázisátalakulások és kémiai reakciók követése az idő és/vagy a hőmérséklet függvényében.

A termoanalitikus készülék az 5. ábrán látható módon áll egy villamos fűtésű kemencéből, egy jelfeldolgozó részből és egy hőmérséklet szabályozó részből. Sok berendezés használható szobahőmérséklet alatt is, ilyenkor a mintával együtt a kemencét is hűtik. A hűtőközeg általában cseppfolyós nitrogén vagy belőle fejlődő hideg gőz.



5. ábra - Termoanalitikai berendezés elvi felépítése. Forrás:

http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/anal/BSc-Analitikai-es-Szerkezetvizsgalati-Szaklabor/Termikus-analisis_jegyzet_1999.pdf, kereső: google.hu, kulcsszavak: termikus analízis, letöltés: 2024.05.01. 19.30

Az alábbiakban a szalma tűzállóságnak, illetve égéskésleltetésének a vizsgálatához használt leggyakoribb vizsgálati módszereket mutatom be, amelyeket a szakirodalmi példáimban is használnak.

Termogravimetria

A termogravimetriás (TG) görbék, melyek a minta tömegváltozását írják le az idő, illetve a hőmérséklet függvényében, termomérleg segítségével veszik föl. Az eredmények áttekintését gyakran segíti a tömegváltozás sebességének az ábrázolása, ezt derivatív termogravimetriás (DTG) görbének nevezik.

Differenciális termoanalízis (DTA) és differenciális pásztázó (scanning) kalorimetria (DSC)

Ha az anyagok entalpiaváltozását követő DTA-t és DSC-t együtt tekintjük, ezeket alkalmazzák legelterjedtebben a termikus analízis módszerei közül. Mindkét módszer a minta által felvett vagy leadott hő áramára jellemző jelet állít elő, és hasonló a DTA és DSC görbék kinézése is. A DTA és DSC technikák között a felhasználás szempontjából az a döntő különbség, hogy az utóbbiak kvantitatív kalorimetriás meghatározásokra is alkalmasak (tehát olvadáshő, reakcióhő, fajhő meghatározására), míg a DTA görbékből általában csak kvalitatív, az anyagban lejátszódó folyamatok hőmérséklet-tartományára, jellegére stb. vonatkozó felvilágosítást kaphatunk, és pontatlanabbak a kalorimetrikus adatok.

[http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/anal/BSc-Analitikai-es-Szerkezetvizsgalati-Szaklabor/Termikus-analisis_jegyzet_1999.pdf, letöltés: 2024.05.01. 19.52]

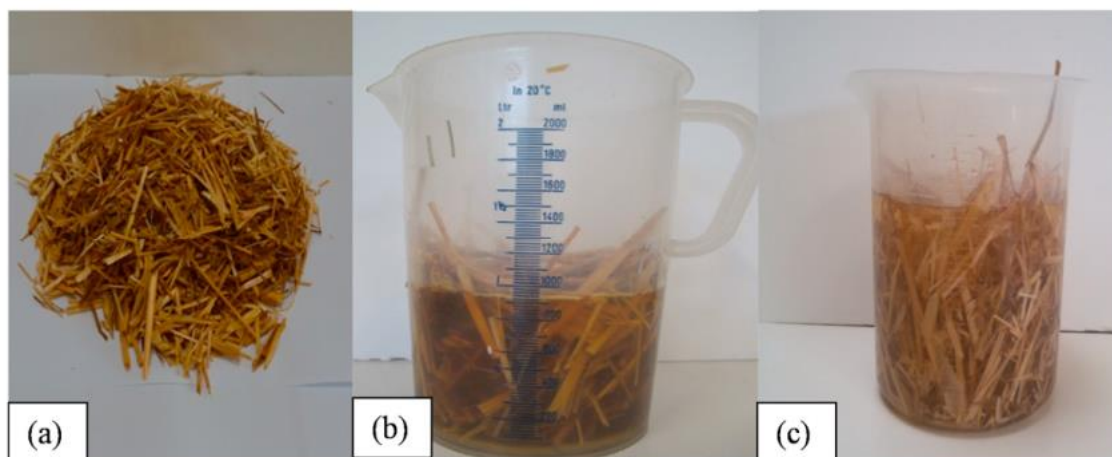
2.6. Cellulózra alkalmazott égéskésleltető anyagok, eljárások

A különféle cellulóz alapú anyagok, textíliák (függönyök, kárpitok, munkaruhák stb.) iránti kereslet az utóbbi években egyre növekszik. Ez a kereslet növekedés indukálja az anyagok égéskésleltetési megoldásainak fejlődését is. A cellulóz alapú anyagok égéskésleltetési lehetőségeivel, az alkalmazott anyagokkal és eljárásokkal számos tanulmány foglalkozik. Mivel a felhasználhatóságában rejlő potenciál széles körben elismert, ezért a szalma és szalma alapú anyagok égéskésleltetésének lehetőségeivel foglalkozó publikációk is szép számban jelentek meg. Az alábbiakban ezek tanulmányok közül mutatok be néhányat.

2.6.1 Szalma égéskésleltetése mész és gipsz hozzáadásával

Egy 2017-es francia tanulmány készítése során a szerzők a felhasznált búza és árpa szalmához mész és gipsz hozzáadásával hoztak létre kompozit próbatesteket, melyeknek a termikus bomlását, valamint gyúlékonyságát vizsgálták.

A szalmát előzetesen kétféle módon kezelték, lenmagolajjal a vízadszorpció csökkentése érdekében, illetve forró vízbe merítették a felületi szerkezetének javítása érdekében. Ezekre az eljárásokra a szalma és a kötőanyagok közötti kölcsönhatások javítása céljából volt szükség.

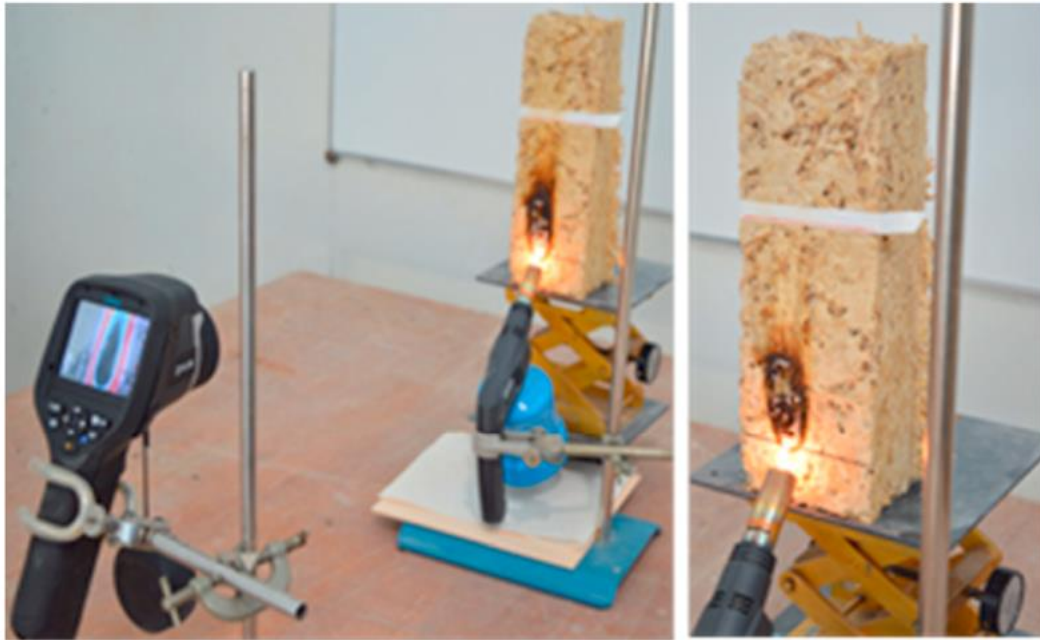


1. kép – (a) kezelés előtt álló szalma; (b) lenmagolaj kezelés; (c) forró vizes kezelés, Forrás: N. BELAYACHI, D. HOXHA, B. ISMAIL [2017] Impact of fiber treatment on the fire reaction and thermal degradation of building insulation straw composite, Science Direct (2017)

A lenmagolajos és forróvizes kezelést követően 60° C-on kiszárították a mintákat a vizsgálatokat megelőzően 48 órával. A kétféle kezelés és a kétféle kötőanyag (gipsz, mész) felhasználásával 12 különböző mintát hoztak létre a vizsgálatokhoz. Mind a 12 típusból 3-3 darabot. A mintákat az EN ISO 11925-2 (2020) „Tűzzel szembeni viselkedési vizsgálatok. Építési termékek gyúlékonysága közvetlen lánghatásra. 2. rész: Vizsgálat „egyetlen láng”

gyújtóforrással” című szabványnak megfelelő 250mm x 90mm x 60mm méretre vágták, hogy a szabvány szerinti egyedi lángos vizsgálatot megfelelően el tudják rajtuk végezni.

A vizsgálatok során az anyagmintákat az EN ISO 11925-2 szabvány szerint közvetlen egyedi lángnak tették ki 15s és 30s időtartamig. A láng a felületet 45°-os szögben éri 5mm-es távolságról. Az E tűzvédelmi osztályú anyag esetében 15s elteltével a láng terjedése magassági értelemben nem haladhatja meg a 150mm-t, D tűzvédelmi osztályú anyag esetében 30s elteltével a 300mm-t.



2. kép - EN 11925-2 szabvány szerinti egyedi lángos gyúlékonysági vizsgálat [N. BELAYACHI ET AL, 2017]

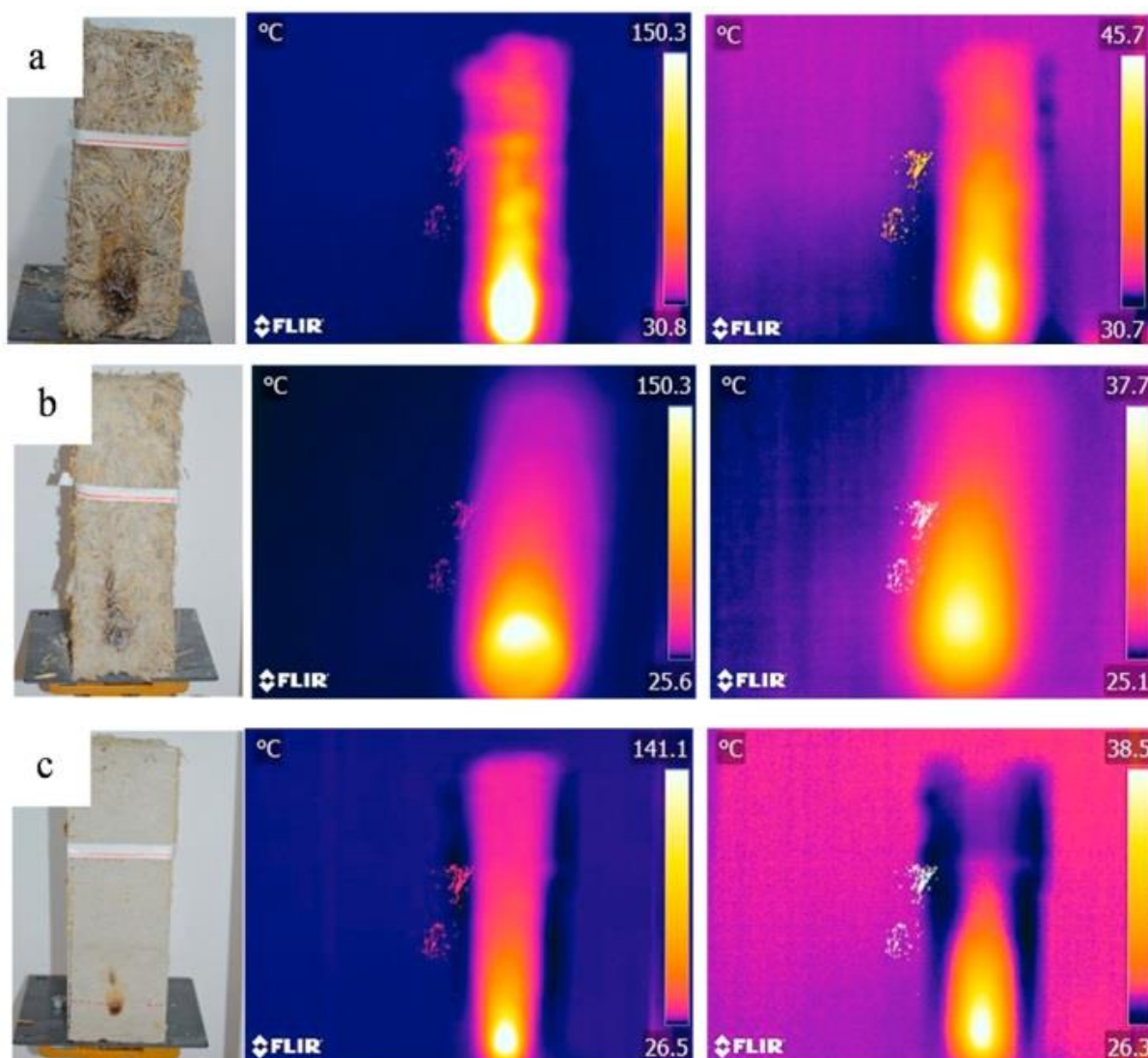
A vizsgálat során infravörös hőmérő segítségével vizsgálták a hőmérséklet-változást a mintákon. A vizsgálatot mind a 12 típusú anyagminta esetében elvégezték 3-3 mintadarab felhasználásával. A lángmagasságot megmérték 20s-mal a 15s-os láng terhelést követően, illetve 60s-mal a 30s-os láng terhelést követően. Mindkét esetben feljegyezték, hogy leváló égő szálak, tarlók jelentkezne-e?

2. táblázat - Vizsgálati eredmények [N. BELAYACHI ET AL, 2017]

Composites and designation	Flame Height (cm) after 20 s removal burner for 15 s of exposure	Droplets Yes/No	Flame Height (cm) after 60 s removal burner for 30 s of exposure	Droplets Yes/No
Wheat-Plaster-Non treated (W-P-NT)	8.5	No	13.4	Yes
Wheat-Plaster-Boiled water (W-P-BW)	9.1	No	10.5	No
Wheat-Plaster-Linseed oil (W-P-LO)	6.1	No	10.2	No
Wheat - lime - Non Treated (W-L-NT)	7.9	No	8.6	No
Wheat-Lime-Boiled Water (W-L-BW)	6.7	No	8.1	No
Wheat-Lime-Linseed Oil (W-P-LO)	5.7	No	7.2	No
Barley-Plaster-Non Treated (B-P-NT)	13.1	Yes	14.2	Yes
Barley-Plaster-Boiled Water (B-P-BW)	7.5	No	9.3	No
Barley-Plaster-Linseed Oil (B-P-LO)	4.5	No	6.7	No
Barley-Lime Non Treated (B-L-NT)	8.2	No	8.5	No
Barley-Lime-Boiled Water (B-L-BW)	6.3	No	9.3	No
Barley-Lime-Linseed Oil (B-L-LO)	3.4	No	4.1	No

Az eredményekből az látszik, hogy a lenmagolajos és forróvizes kezelés égéskésleltető hatású, hiszen minden esetben kisebb lett a mért lángmagasság, mint a kezeletlen minták esetében. Leváló tarló is csak a kezeletlen minták esetében jelentkezett. Az összes minta megfelelt a 15cm-es maximum lángmagasság elvárásnak, tehát a D tűzvédelmi osztálynak. A legjobb eredményeket mutató minta az árpaszalma és mész felhasználásával, lenmagolajos kezeléssel készített volt.

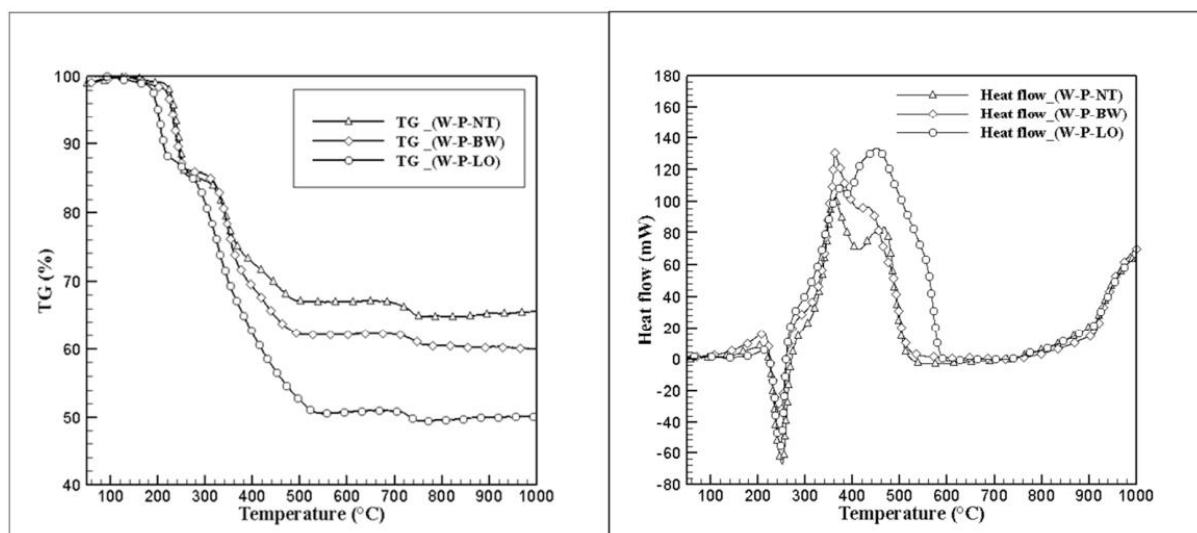
Az infravörös hőmérővel mérték a hőterjedést a vizsgálat során, majd 5 perccel a vizsgálat után is. A mérésből az látható, hogy a láng eltávolítása után nem emelkedik tovább a hőmérséklet, tehát a lángterjedés leáll, valamint 5 perc elteltével a hőmérséklet jelentősen lecsökken. N. BELAYACHI ET AL [2017]



3. kép - Infravörös hőmérő vizsgálati eredmények [N. BELAYACHI ET AL, 2017]

A termikus bomlás során fellépő tömeg vesztést és hőterjedést termogravitációs analízissel és (TG/TGA) és differenciális pásztázó kalorimetria (DSC) segítségével vizsgálták. Ehhez a vizsgálathoz 20mg-os por állagú mintákat helyeztek olvasztótégelybe és melegítették 1000 °C-ra 20 °C/min intenzitással.

A mérési eredményeket a búzaszalma és gipsz felhasználásával készült 3 féle (kezeletlen, lenmagolajjal kezelt, forró vízzel kezelt) mintadarab esetében az alábbi, 5.számú ábra szemlélteti.



6. ábra - Termikus bomlás és hőterjedés vizsgálat [N. BELAYACHI ET AL, 2017]

Az ábrákon jól látszik, hogy a forróvízes és lenmagolajos kezelésnek jelentős hatása van a termikus bomlásra, a kezelt minták esetében nagyobb a lebomló tömeg, mint a kezeletlen mintánál. A legnagyobb tömeg vesztes 260-500° C közötti tartományban következett be. A legnagyobb hatást a mintára a lenmagolajos kezelés jelentette.

A termikus bomlás jól megfigyelhetően exoterm reakció. A mintákban a legnagyobb eltérést a hőáram tekintetében is a lenmagolajos kezelés okozta. A felszabaduló hő magasabb hőmérsékleten jelentkezett, mértéke megegyezik a forróvízes kezelést kapott mintáéval.

A mérési eredmények tekintetében a szerzők arra konklúzióra jutnak, hogy a lenmagolajos kezelés makroszkopikus pozitív hatását, az égéskésleltetésben mutatott jelentős hozzájárulást, szembe állítva a mikroszkopikus negatív hatással, további vizsgálatok szükségesek, hogy el lehessen dönteni a kezelés hatásosságának mértékét a szalma alapú kompozit termékek esetén. N. BELAYACHI ET AL [2017]

2.6.2. Tűzálló kukorica szalma téglá. Termikus stabilitás, éghetőség és égéskésleltetés

Egy friss, 2023-as kínai vizsgálat során a szerzők kukoricaszalma és kalcium-hidroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, más néven oltott mész) felhasználásával készítettek „tűzálló kukoricaszalma téglát” és vizsgálták annak tűzállósági tulajdonságait Muffle-kemencében végzett vizsgálatokkal, oxigén index méréssel (LOI, limited oxygen index), valamint függőleges éghetőség vizsgálattal az amerikai UL94 V vizsgálati eljárásnak megfelelően.

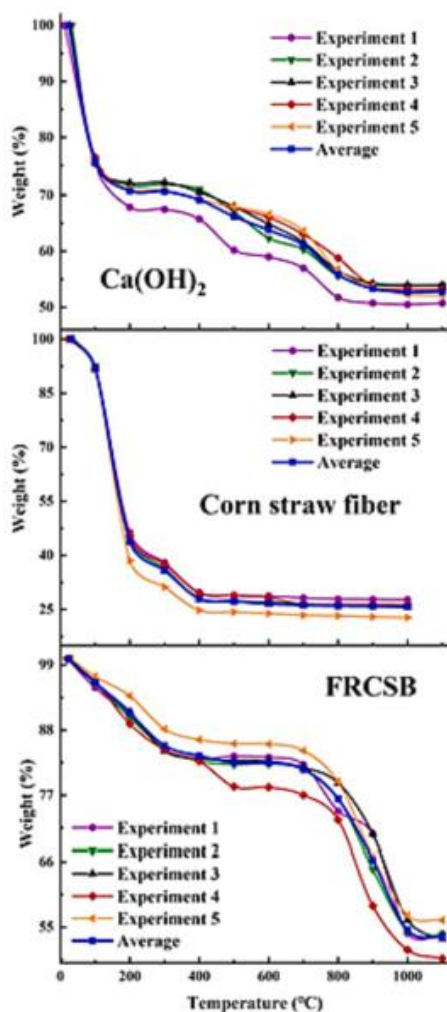
Kína napjaink legnagyobb téglagyártója és felhasználója a hatalmas ingatlan szektorának köszönhetően. Az égetett agyag téglák előállítása nem környezettudatos, ezért többféle alternatív megoldást vizsgáltak már, amely adott esetben a mezőgazdasági hulladékként keletkező szalmát hasznosítja. Ilyen megfontolás alapján végeztek kísérleteket a szerzők a kukoricaszalma és oltott mész összetételű téglák éghetőségének vizsgálata céljából. Ugyan az alkalmazás itt nem elsősorban hőszigetelés, de a kísérleti eredmények jó indikátorai a mésszel kezelt szalma tűzállóságának.

A próbatestek elkészítése során a kukoricaszalmát összezúzták, meghatározott lyukbőségű szitán átszűrték, majd összekeverték a kötőanyagnak használt oltott mésszel és így hozták létre a 6. ábrán látható melegen sajtolt téglát. T. ZHANG, Y. LU, Z. LU [2023] A flame-retardant corn straw brick (FRCSB): Thermal stability, flammability and flame-retardant mechanism. Construction and Building Materials 401 (2023)



7. ábra - Tűzálló kukoricaszalma téglák előállítása. Forrás: [T. ZHANG ET AL, 2023]

Ezt követően Muffle-kemencében hőkezelésnek vetették alá a kalcium-hidroxidot, a finom szalmát és az előállított téglákat, hogy össze tudják vetni a tömegvesztést az alapanyagok és a létrehozott kompozit anyag esetében. A vizsgálat során 100° C hőmérsékletű kemencében helyezték a mintákat 1 óra időtartamra, majd hagyták visszahűlni szobahőmérsékletűre. Miután lehűlt a minta, újra visszahelyezték az ekkor már 200° C-ra melegített kemencébe, szintén 1 órára. Ezt az eljárást folytatták egészen 1100° C-ig. A tömegvesztést minden esetben 0,01 gr pontossággal mérték miután a minta visszahűlt szobahőmérsékletűre, valamint a téglák esetében a geometriai változást, térfogat csökkenést is feljegyezték. A mért értékek alapján az alábbi, 7-es számú ábra adódott az egyes tömegvesztésekre. Az ábrán az FRCSB (Flame-Retardant Corn Straw Brick) jelöli a téglát. [T. ZHANG ET AL, 2023]

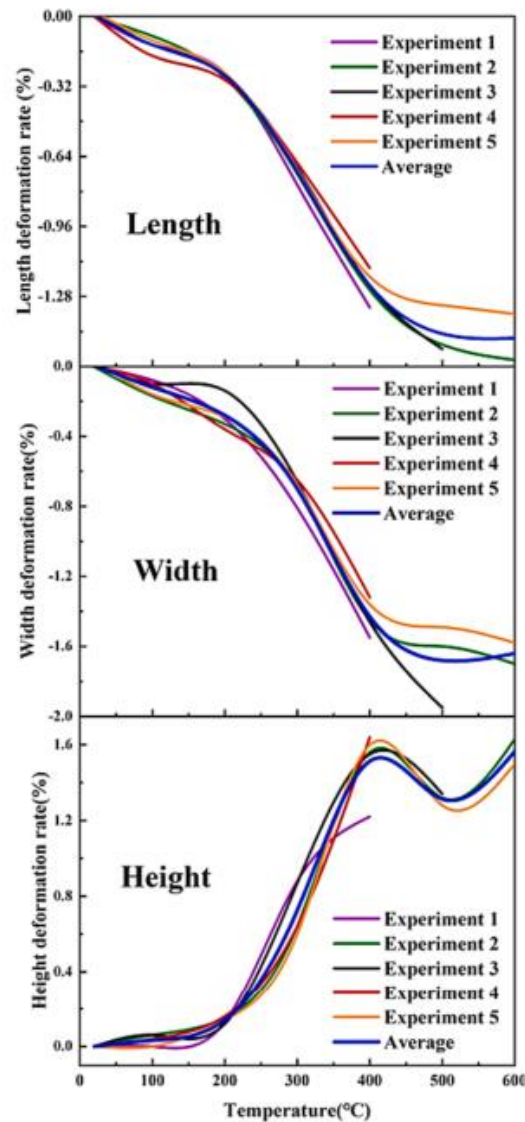


8. ábra: Tömegveszteségek a hőmérséklet függvényében. Forrás: [T. ZHANG ET AL, 2023]

Az alkalmazott anyagok tömeg és térfogat vesztese különösen fontos az épületek tűzvédelme szempontjából, hiszen a tűz terjedése és maga szerkezet állékonysága és szorosan kapcsolódik ezekhez a tulajdonságokhoz.

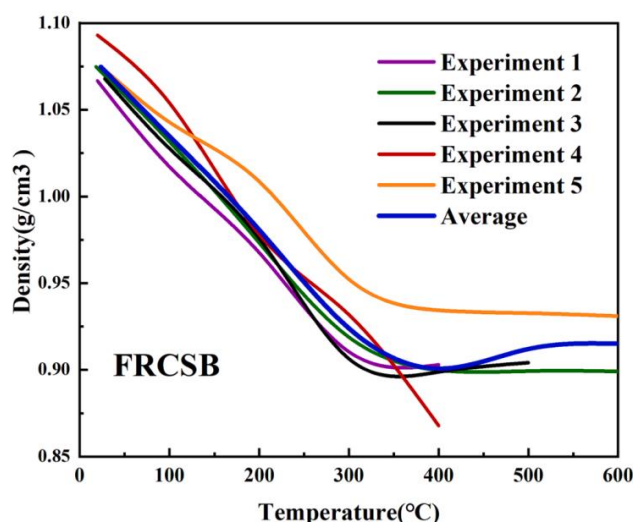
A fenti diagramokból jól látható, hogy a tömegvesztés a „nyers” alapanyagok esetében gyorsabb és intenzívebb, mint a kompozit téglá esetében, így a téglá tűzvédelmi szempontból jobb tulajdonságokkal rendelkezik. A mész és a finom szalma esetében a víztartalom elvesztése miatt 100°C után meredek tömegveszteség keletkezik. A téglá a tömegének 80%-át meg tudja tartani 700°C-ig, ezt követően gyorsan, jelentős tömegveszteség jelentkezik.

A tárfogat vesztes és geometriai változás szintén vizsgálva lett a téglá esetében. A 8. ábrán láthatóak a mérési eredmények. A téglá egyes méretei szempontjából az eltérés százalékos értékben megadva a kezdeti értékhez képest, adott hőmérséklet függvényében.



9. ábra - Téglá geometriai méreteinek változás a hőmérséklet függvényében. Forrás: [T. ZHANG ET AL, 2023]

A geometriai méretek változása a téglá esetében logikailag jól kapcsolódik a tömegvesztést ábrázoló diagramhoz, 100 – 400 °C között játszódik le a tömeg, valamint a térfogat vesztes jelentős része, majd ezt követően egy egyensúlyi helyzet áll be 800 °C-ig. A térfogat és a tömeg arányát kifejező sűrűség is ily módon kifejezhető a hőmérséklet függvényében az alábbi, 9-es számú ábrával.



10. ábra - Sűrűség alakulása a hőmérséklet függvényében. Forrás: [T. ZHANG ET AL, 2023]

A körülbelül 1,1 g/cm³ kezdeti sűrűség a tömegvesztés miatt lecsökken 300 °C-ig átlagosan 17-20%-kal 0,9 g/cm³ körüli értékre, majd itt egy egyensúlyi állapot áll be a tömeg és térfogat változást szemléltető ábrákkal összhangban.

Az oxigén index (LOI) egyre gyakrabban használt módszer minőség-ellenőrzésre, valamint kutatásra. Lényege, hogy a mérés során kimutatható az az oxigéntartalom térfogatszázalékban, amelynél az anyag még képes a lángterjedésre, illetve meghatározott idejű égésre. A LOI méréssel meghatározott értékek ugyan nem számítanak szabványos minősítésnek, de a kísérlet szempontjából jó irányadó értékek az éghetőség szempontjából. A LOI érték alapján az anyagok négy csoportba sorolhatók:

1. LOI < 20,95% - „könnyen éghető anyagok”
 2. 20,95% < LOI < 28,00% - „nehezen éghető anyagok”
 3. 28,00% < LOI < 100% - „önkioltó anyagok”
 4. LOI = 100% - „nem éghető anyagok”
- KEREKES ZS., LUBLÓY É., RESTÁS Á. [2016] Az oxigén index (LOI) alkalmazásának lehetőségei a tűzvédelmi minősítésekben. In: Védelem Tudomány, 2016. I. évfolyam 3. szám, <https://ojs.mtak.hu/index.php/vedelemtudomany/article/view/13014/10492>, kereső: google.hu, kulcsszavak: LOI, oxigén index, mérés, letöltés: 2024.05.03.

A vizsgált mintadarab LOI értékére 100% adódott, tehát nem éghető anyagnak minősül a fentiek értelmében.

A vertikális éghetőségi vizsgálatot az amerikai UL94 V vizsgálati eljárás mentén végezték. Ezt az eljárást legalább 5 mintán kell végezni, kétszer 10 másodperces nyílt láng terhelést. Ezt

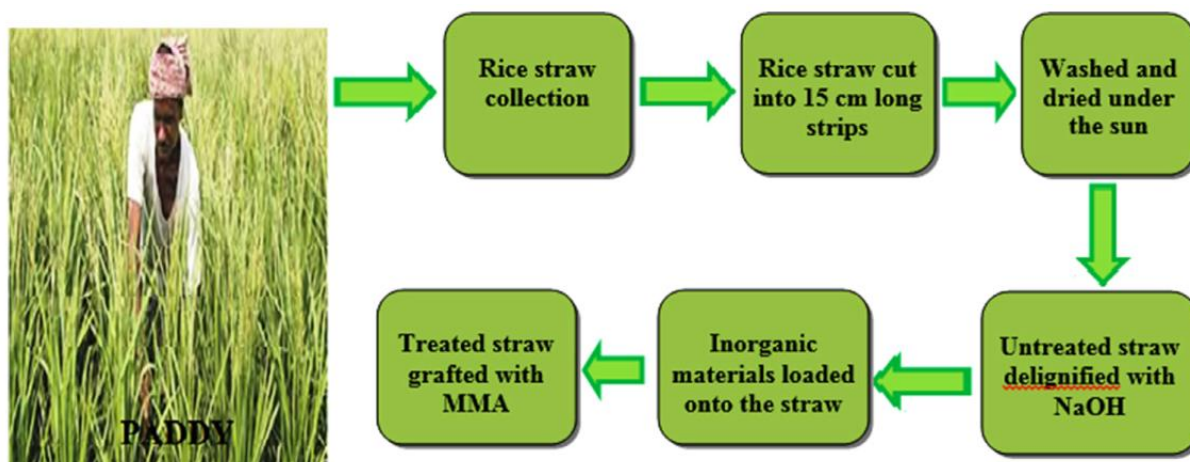
követően mérik az első és második láng terhelés után az önálló láng idejét esetleges tovább terjedését. Amennyiben az első terhelést követően a láng 10 másodpercen belül, a második terhelést követően 30 másodpercen belül elalszik és az 5 minta esetében az összes láng terhelést követően az összes önálló láng együttesen 50 másodpercen belül elalszik, akkor a minta V0 minősítésű, ami a vizsgálattal elérhető legjobb éghetőséget jelenti. [<https://www.etscablecomponents.com/blog/2014/05/ul94-flammability-rating-mean/>; letöltés: 2024.05.10. 21.22]

A szerzők által vizsgált minták V0 minősítést értek el a vizsgálatok során, így a fenti eredményeket is figyelembe véve kiváló tűzállósági tulajdonságú kompozit építőanyagot hoztak létre kukoricaszalma és oltott mész felhasználásával.

2.6.3. Rizsszalma kezelés metil-metakriláttal

Egy 2020-as indiai tanulmány a rizsszalma tűzállóságát vizsgálta. A rizsszalma szintén nagy mennyiségben található meg többek között India mezőgazdaságában, jellemzően állatok etetésére használják, vagy elégetik, ami tovább szennyezi a környezetet. A szerzők, az Indiában jellemzően tetőfedésre használt rizsszalma tűzállóságának növelése céljából metil-metakriláttal oltott rizsszalmát vizsgáltak. A. MUKHERJEE, B. KARMAKAR, G. HALDER [2020] Response surface optimized free radical grafting of methyl methacrylate on delignified rice straw for evaluating its application potential as flame retardant roofing material. Chemical Engineering Journal Advances 1 (2020).

A kezelés lépéseit az alábbi, 10-es számú ábra mutatja be.

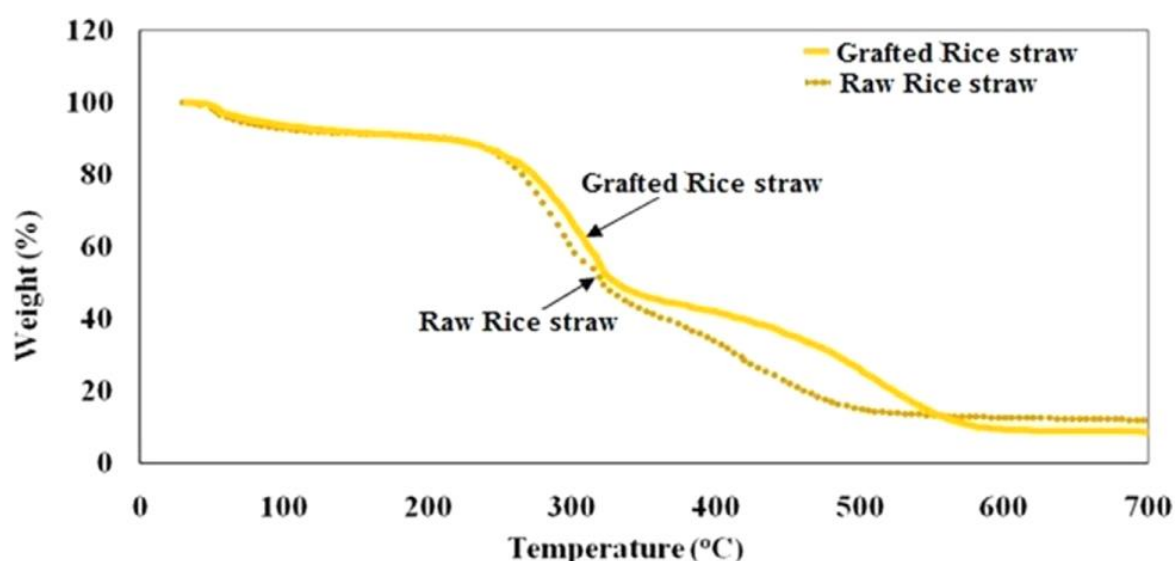


11. ábra - Rizsszalma kezelésének lépései. Forrás: [A. MUKHERJEE ET AL, 2020]

Látható, hogy a kezelés több lépésből álló folyamat. A betakarítást követően a szalmát jelen esetben 15cm hosszú szálakra aprították és a vizsgálathoz 100g-os egységekbe szelektálták. Ezt követően megmosták a külső szennyeződések eltávolítása végett, majd kiszáritották.

A kezelés hatékonyságának növelése érdekében kémiai úton eltávolították a lignint a szalmából. Ehhez 7,59% térfogatszázalékos NaOH oldatot használtak, melyben a szalmát 75,11 percig fürösztötték, majd folyó csapvíz alatt újra lemosták és utána 2 napig a napon szárították. Ezt követően szerveztlen anyagokkal kezelték a szalmát a tűzállóság növelése érdekében. A folyamathoz 20g nátrium-szilikátot használtak, 15g bórsavat 100ml vízben oldva, 12g alumínium trihidrátot szintén 100ml vízben oldva és ezen anyagoktól függetlenül 1000ml desztillált vízben oldott 15g karbamidot. A szalmát megfürösztötték az oldatokban majd 30 percig 50° C-ra melegített kemencében és ezt követően még 8 órán keresztül a tűző napon szárították. Az így elkészült szalma már alapvetően égéskésleltetettnek minősül, azonban további hatékonyság növelés céljából metil-metakriláttal oltották a mintát.

A hő hatására bekövetkező termikus bomlást termogravitációs analízissel (TG/TGA) vizsgálták 800° C hőmérsékletre történő melegítés során. A kezelt szalma mintát kezeletlen mintával vetették össze. Az eredményeket a 11. ábra szemlélteti. [A. MUKHERJEE ET AL, 2020]



12. ábra - Metil-metakriláttal kezelt és kezeletlen minta termikus bomlása. Forrás: [A. MUKHERJEE ET AL, 2020]

Az látható az ábrán, hogy a termikus bomlás 100° C-on kezdődik meg, ahol a víztartalom csökken mindkét minta esetében. 200-360° C között található a termikus bomlás 2. szakasza, ahol a cellulóz és hemicellulóz bomlása játszódik le és 361-550° C között pedig a 3.szakasz, melyben a natúr minta esetében a lignin bomlik le, a kezelt minta esetében pedig a metil-

metakrilát. A 3. szakaszban mutatkozik meg a legnagyobb különbség a kezelt minta javára a termikus bomlást illetően.

A tanulmány során vizsgálták a kezelt minta LOI értékét is és azt az eredményt kapták, hogy a minta LOI indexe 25,1%, tehát a kezelt rizsszalma „nehezen éghető anyagnak” minősül.

A fenti mérések ugyan pozitív eredményeket szolgáltatnak, viszont a kezelési eljárás bonyolultsága és időigénye, valamint a sok felhasználandó nem teszi gazdaságossá a rizsszalma ilyen formájú égéskésleltetését.

3. PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA

A szalma tehát alapvetően kiváló alapanyag építőipari felhasználás céljából. Remek hőszigetelő képességgel bír, nagy mennyiségben hozzáférhető, olcsó az előállítása, természetes anyag. A jó tulajdonságai ellenére a köztudatban negatív érzéseket kelt a használata a könnyű éghetősége miatt. Holott ez csupán a szálal szalmára igaz, esetleg az alacsony testsűrűségű bálákra, azonban a magas testsűrűségű szalma elemekre már sokkal kevésbé. A legalább 100-120 kg/m³ testsűrűségű elemek égése során a külső elszenesedett réteg jól szigetel és védi a belső rétegeket a tűz káros hatásaitól, csakúgy, mint a fa szerkezetek esetében, valamint a szálirány is jelentős hatást gyakorol az éghetőségre, hiszen a cellulóz alapú szalma üreges szerkezete alapvetően támogatja a tűz terjedését, ezért a szálirányt mindig kiemelt gondossággal kell megválasztani. A tűzzel szembeni ellenállóképesség tovább javítható természetes és mesterséges égéskésleltető alkalmazásával, illetve a vakolt szalma is kísérletekkel bizonyítottan 90 percig is képes ellenállni a tűznek.

Mindezek ellenére a magyar jogszabályi környezetben a szalma F tűzvédelmi osztályú anyagnak számít, melynek a tűzzel szembeni viselkedése nem meghatározott. Ezen építőanyagok beépítése tilos. Kivételt képeznek azok az esetek, amikor más építőanyagok teljes mértékben takarják, és az így létrejött termék legalább E osztályú.

A szakirodalmi kitekintés jól mutatja, hogy a szalma égéskésleltetésére számos anyag alkalmas lehet és ezeken a konstrukciókon több nyílt lángos kísérletet is végeztek. Ezek a kísérletek fontosak, hiszen az EN ISO 13501-1 szabvány, mely az építési anyagok, termékek tűzzel szembeni viselkedésének meghatározását írja le, valamint az alkalmazható vizsgálatokat meghatározza, kivétel nélkül nyílt lángos módszereket ad meg. A sugárzó hőre vonatkozó vizsgálatok nem szerepelnek a szabványban, nincs ilyen hivatalosan elfogadott vizsgálati módszer pedig nagyon fontos jelenségről van szó, hiszen a tüzet, lángot hő előzi meg. A

termikus bomlás a szakirodalmi áttekintésben megismert módon már 200 °C körül beindul, így a veszélyes folyamatok már a láng megjelenése előtt.

Dolgozatomban célul tűzöm ki a szalma sugárzó hővel szembeni tulajdonságainak megismerését. Erre a célra az SSH-Terra Kft. által az Óbudai Egyetem részére készített szalma próbatesteken egy egyedi fejlesztésű kísérleti eszközzel fogok méréseket végezni. Meg fogom vizsgálni a kezeletlen szalma, valamint különböző égéskésleltetőkkel különböző módon kezelt minták viselkedését sugárzó hő hatására. Többféle kísérleti módszert is alkalmazni fogok annak érdekében, hogy a jelenséget minél jobban megismerjem.

4. VIZSGÁLATOK

A vizsgálatokat az Óbudai Egyetem Ybl Miklós Építéstudományi Karának Tűzvédelmi laborjában hajtottam végre több hallgató társammal együtt, Kerekes Zsuzsanna PhD. egyetemi docens felügyelete mellett.

Mivel sem az eljárás, sem az eszköz nem szabványos, ezért többféle módon megvizsgáltam a szalmát, hogy a különböző vizsgálati eljárások és azok eredményei alapján további konklúziót tudjak levonni.

A vizsgálatok során kezeletlen, natúr mintát, valamint többféle égéskésleltetővel kezelt mintát is vizsgáltam. A felhasznált égéskésleltetők pontos összetétele üzleti titok, ezért dolgozatomban nem tudom közzé tenni, a felhasznált anyagokra vonatkozóan tudok információt közölni.

4.1. Vizsgálati minták

A vizsgálati mintákat az SSH-Terra Kft. bocsátotta rendelkezésemre. A szalma elemeket a saját fejlesztésű megmunkáló gépükkel készítik és az így készített szalmapaplan kereskedelmi forgalomban is kapható.

A minták az EN 11925-2 szabványnak megfelelő 250mm x 90mm x 60mm-es méretben készültek, azonos 80 kg/m³ testsűrűséggel, éghető anyagú üvegszál hálóval varrva, a 4. számú képen látható módon. Minden minta azonos minőségű szalmából készült. Az égéskésleltető szerek hozzáadása felületi szórással és áztatásos kezeléssel történt. A két kezelési módszernek megvannak a saját előnyei, illetve hátrányai. A szórásos technológia kevesebb anyagfelhasználással jár, átlagosan 82gr/minta, valamint gyorsabban is megszárad, azonban csak felületi védelmet jelent. Az áztatásos technológia több anyagfelhasználással jár, mintánként átlagosan 250gr anyaggal, továbbá nagyon lassan szárad meg, esetünkben minden

minta legalább 3 napot állt ilyen céllal a telephelyen, viszont teljes keresztmetszetben védelmet nyújt várhatóan jobb értékekkel.



4. kép - Szalma mintadarab. Saját kép

4.2. Vizsgálati módszer

A sugárzó hővel szembeni viselkedést egy egyedi készítésű műszerrel vizsgáltam. Az eszköz kialakítása során egy hagyományos villanyrezsó került felhasználásra. A rezsó alkatrészei egy 30cm x 30cm méretű, 2mm falvastagságú alumínium bordáslemez házban lettek elhelyezve. A rezsó főzőlapja, egy 15cm átmérőjű kör keresztmetszetű vaslap az alumínium ház függőleges oldalán helyezkedik el oly módon, hogy a vizsgáló asztal felső síkja felett 18cm magasságban helyezkedik el a középpontja. A készülék hálózati áramról üzemeltethető, a vasmag túlhevülés ellen védett, digitális termoelemmel végzett mérés alapján a maximális hőmérséklete 650 °C. Ez a hőmérséklet a cellulóz termikus bomlásának ismeretében elegendő a vizsgálatok elvégzéséhez. Az készülék túlhevülés elleni védelem céljából 3cm magas talpakon áll és utólagosan készített furatok biztosítják a szellőzést a ház oldalán. A készülék az 5. képen látható.



5. kép - Sugárzó hő vizsgálati készülék. Saját kép

A sugárzó hővel szembeni viselkedést kétféle módszerrel vizsgáltam. Mindkét módszer során a füst megjelenését, a szalma elszíneződését és az izzás kezdetét jegyeztem fel a minta jellemzésére az eltelt idő és a hőmérséklet függvényében. A hőmérsékleteket K típusú, króm-króm termoelemmel mértem.

Először kezeletlen mintát vizsgáltam állandó távolságú hőforrással. A hősugárzó készülék vasmagját a búza felületétől 14cm-re helyeztem el. Ezt a távolságot elegendőnek ítéltem meg ahhoz, hogy a reakció kellően lassú legyen és a folyamatot jól meg tudjam figyelni. A mintát az éghető, üvegszövet hálóval ellentétes oldalával fordítottam a hőforrás felé, hogy ne befolyásolja a mérést a háló reakciója a sugárzó hőre.

További 3 égéskésleltetővel kezelt mintát vizsgáltam állandó távolságú hőforrással. Ezen méréseknél a hőforrást 7cm-es távolságban helyeztem el a minták felületétől. Azért választottam kisebb távolságot, mert a kezelt minták esetében a reakció ugyanakkora távolságban jóval lassabb lett volna, mint a natúr szalma esetén. Ily módon 3 kezelt mintát vizsgáltam 4db termoelem felhasználásával. Egy termoelemet helyeztem el a minta felületén, egyet 1cm mélyen, egyet 2cm mélyen és egyet 5cm mélyen. Így a kezelt mintában jobban megfigyelhető volt a hőterjedés a mintán belül és felvehető volt a hőmérsékleti profil a vizsgált

rétegekben. Ezt fontos szemléltetője annak, hogy a hő miként terjed át a mintán, milyen szigetelő képességgel rendelkezik az adott keresztmetszet. A mérési eredményekből kirajzolódó hőmérsékleti profilt hőmérséklet-idő diagramokon ábrázoltam. A kezelt minták esetében mindig az üvegszövet hálójával borított oldalt fordítottam a hőforrás felé, mert így lehet valós képet kapni a próbatestről, mint termékről. Ezek a vizsgálatok további mérések alapjául szolgáltak, így fontos volt azt is tudni, hogy mennyire befolyásolja a reakciót a felhasznált kötőanyag.

A második módszer során előre meghatározott, 45cm távolságról indítottam a készüléket és amint a hőmérséklet beállt egyensúlyi állapotra, folyamatosan közelítettem a műszert a mintához. A vizsgált távolságok a minta felületétől számítva: 45cm, 30cm, 25cm, 18cm, 15cm, 10cm. Ez a módszer fokozatosabb, lassabb hőmérséklet emelkedéssel jár, így jobb lehetőség van a reakciók megfigyelésére.

Három, égéskésleltetővel kezelt mintát vizsgáltam változó távolságú hőforrással. Ezen minták esetében három termoelemmel mértem a hőmérséklet növekedést, a felületen elhelyezett, 1cm mélységben elhelyezett, valamint 2cm mélyen elhelyezett termoelem segítségével. A különböző termoelemek mérési eredményeiből kirajzolódó hőmérsékleti profilt hőmérséklet-távolság diagramokon ábrázoltam.

4.3. Vizsgálati eredmények

A vizsgálati eredményeket a különböző mérési módszerek alapján külön fogom ismertetni, majd a fejezet végén egy összefoglaló táblázatban az összes értéket együtt feltüntettem az átláthatóság érdekében.

4.3.1 Állandó távolságú sugárzó hő – kezeletlen minta

Állandó távolságú sugárzó hőre a kezeletlen mintát 14cm távolságban helyeztem el a sugárzó hőforrástól. A felületen elhelyezett termoelem segítségével mértem a füstképződés, elszíneződés és az izzás kezdetéhez kapcsolódó hőmérsékleti értékeket. A kísérleti kialakítást a 6. számú kép szemlélteti.

Kezeletlen minta

6. kép - Kezeletlen minta vizsgálata. Saját kép

A mérési eredményeket a 2-es táblázat tartalmazza. A füstképződés már 145°C -on megkezdődött, ami jól szemlélteti, hogy jóval a láng megjelenése előtt már a termikus bomlási folyamat elkezdődik. Ezt követően a szalma 160°C hőmérsékleten elkezdett elszíneződni, és nem sokkal később 190°C -on már megjelent az izzás. Ekkor a kísérletet leállítottam.

3. táblázat - Kezeletlen minta mérési eredmények. Saját forrás

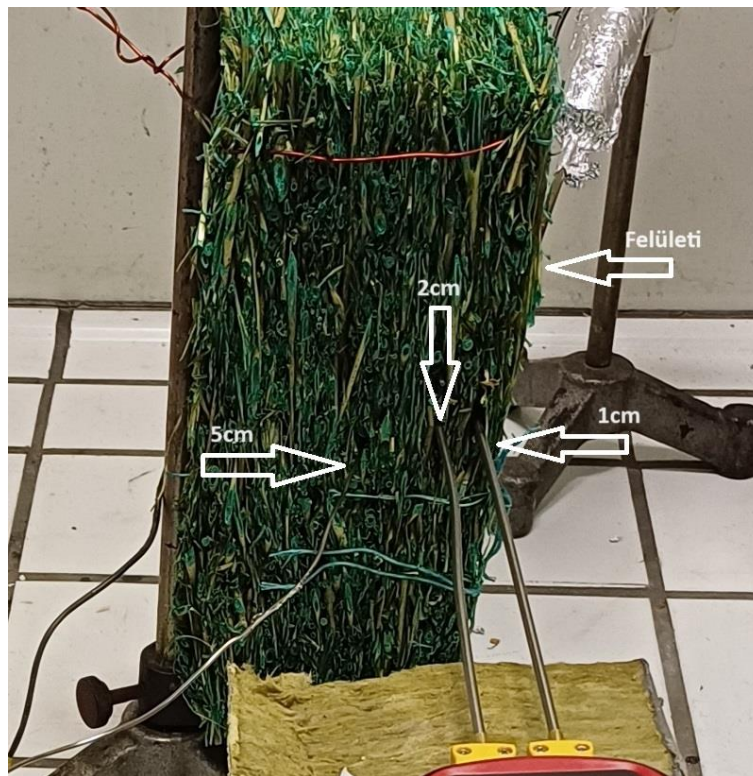
	Hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	145	14
Elszíneződés	160	14
Izzás kezdete	190	14

A kapott értékek alapul szolgálnak az égéskésleltetővel kezelt mintákkal végzett kísérletekhez. A natúr szalma esetében az időt nem mértem, mely az egyes nevezetes részfolyamatok eléréséhez volt szükséges, ezt csak az égéskésleltetők szempontjából tartottam relevánsnak az összehasonlíthatóság szempontjából.

4.3.2. Állandó távolságú sugárzó hő – kezelt minták

Állandó, 7cm-es távolságú sugárzó hővel szembeni viselkedését vizsgáltam 3db égéskésleltetővel kezelt mintának. A minták felületén és a mintákban lévő hőfejlődést 4db

termoelemmel mértem, melyeket a felületen, 1cm mélyen, 2cm mélyen, valamint 5cm mélyen helyeztem el a 7. képen látható módon.

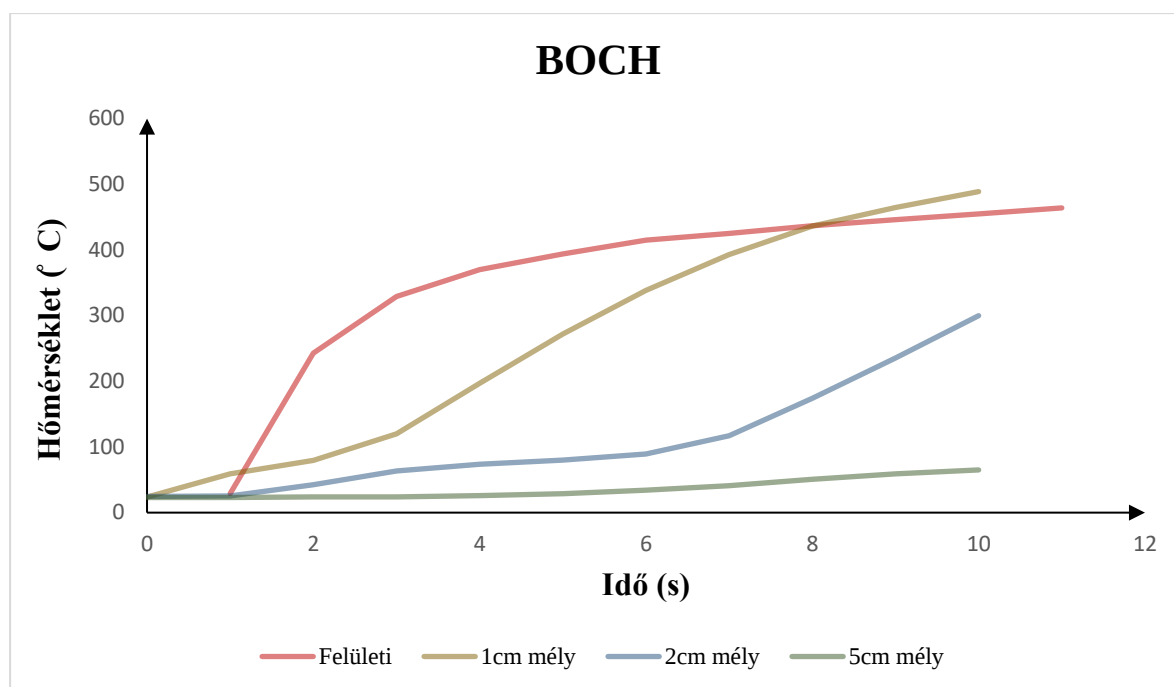


7. kép – Termoelemek elhelyezkedése állandó távolságú sugárzó hő vizsgálat során. Saját kép

BOCH minta

A minta áztatásos technológiával került kezelésre. Az égéskésleltető anyag a kereskedelmi forgalomban kapható BOCHEMIT égéskésleltető favédő szer.

A készülék bekapcsolását követően a hőmérséklet növekményt percenként feljegyeztem, majd a mérést gyulladás hiányában 10 perc elteltével leállítottam. Az volt megfigyelhető, hogy a minta felülete, ami természetsszerűleg a leggyorsabban és legmagasabb hőmérsékletre melegedett fel, a kezdeti gyors melegedési szakasz után egy egyensúlyi állapotra állt be és csak igen minimális mértékben tudott tovább melegedni. Ez az egyensúly 450°C hőmérsékleten következett be. Ez a 450°C már jelentősen meghaladja a natúr mintánál tapasztalt 190°C hőmérsékletet, amelynél az izzás bekövetkezett, továbbá jelen esetben izzásról nem is lehetett beszámolni. Az egyes termoelemek által mért és percenként feljegyzett adatok az alábbi, 6-os számú ábrán látható hőmérséklet-idő diagramot jelölték ki.



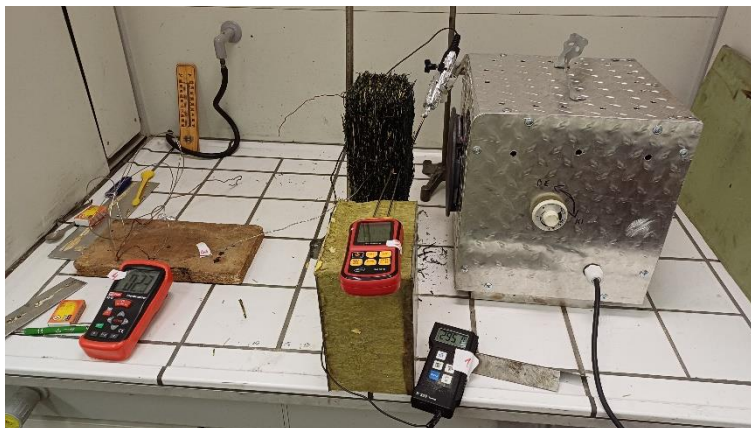
13. ábra - BOCH minta hőmérséklet-idő diagram. Saját forrás

A diagramon az látható továbbá, hogy a keresztmetszeten belül a hőmérséklet csak kisebb mértékben emelkedett. Az 1cm mélyen lévő termoelem a vizsgálat végére elérte a felületen mért értéket, azonban az emelkedés mértéke csekélyebb volt. A 2cm és 5cm mélyen elhelyezett elemek már jóval kisebb hőmérsékletet érzékeltek, ami azt mutatja, hogy a hőszigetelő képessége a mintának a vizsgálat során nem romlott le drasztikusan, tehát jól biztosítja a mentett oldalon az alacsony hőmérsékletet.

4. táblázat - BOCH minta mérési eredmények. Saját forrás

	Hőmérséklet (°C)	Idő (sec)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	130	29	7
Elszíneződés	252	65	7
Izzás kezdete	-	-	7

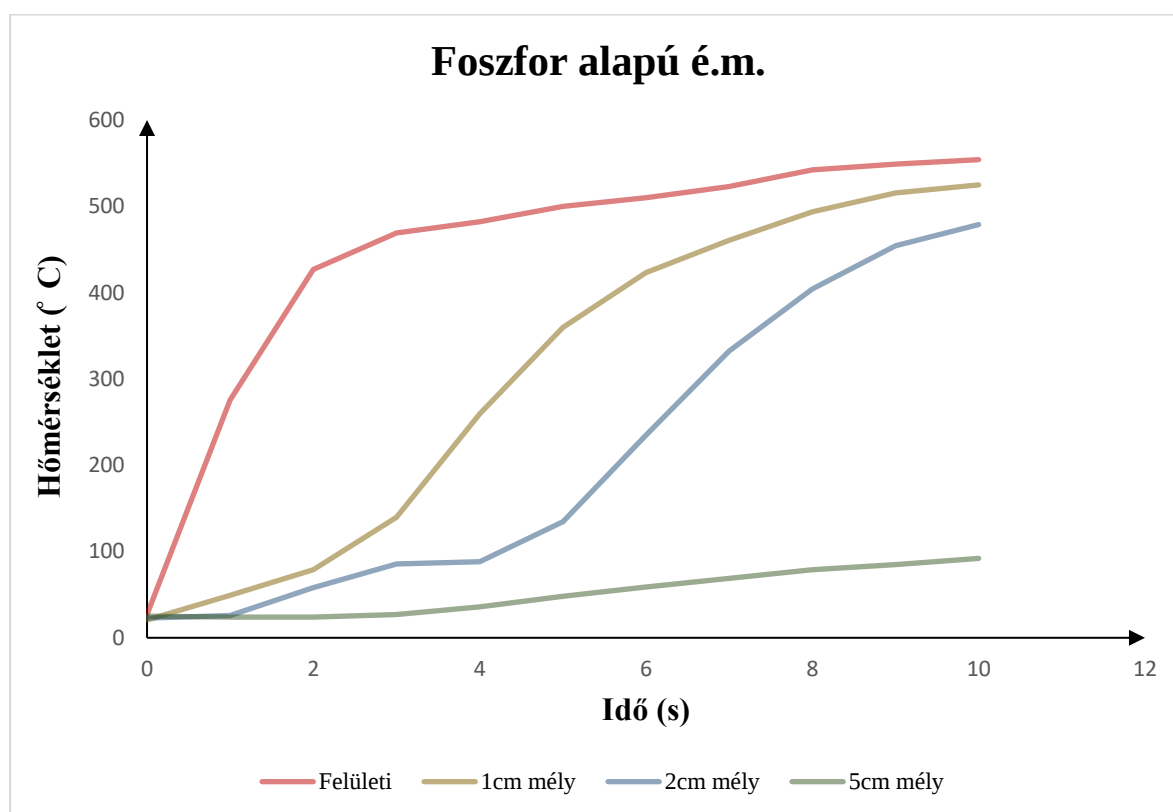
A füst megjelenése viszonylag alacsony hőmérsékleten bekövetkezett, azonban ekkor nem a szalma, hanem a kötőanyag kezdett el füstölni. Az elszíneződéshez már magasabb hőmérsékletre volt szükség, izzás, illetve gyulladás nem történt a mérés 10 perce során.



8. kép - BOCH minta vizsgálata. Saját kép

Foszfor alapú szerrel égéskésleltetett minta

A minta szórásos technológiával került kezelésre egy foszfor alapú égéskésleltető anyaggal, melynek pontos összetételét üzleti titok miatt nem tudom közzé tenni. Hasonló mérési körülmények között az elhelyezett öt darab termoelem percentként feljegyzett mérési eredményei a 7. ábrán látható diagramot rajzolták ki.



14. ábra – Foszfor alapú szerrel égéskésleltetett minta hőmérséklet-idő diagram. Saját forrás

Az látható, hogy a felületi hőmérséklet jelen esetben jóval magasabb volt. A maximális mért érték 554°C lett, azonban izzás vagy láng ekkor sem jelent meg, így láthatóan az égéskésleltető megfelelő hatást fejt ki. A hőmérséklet eloszlás a keresztmetszet belseje felé haladva jelen minta esetében egyenletesebb, 5cm mélyen a 100°C -t sem éri el a hőmérséklet. Ez azt jelenti, hogy a hőszigetelési képessége a mintának szintén nem romlott a sugárzó hő hatására.

5. táblázat – Foszfor alapú szerrel égéskésleltetett minta mérési eredmények. Saját forrás

	Hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$)	Idő (sec)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	105	17	7
Elszíneződés	223	52	7
Izzás kezdete	-	-	7

A 4. táblázat alapján látható, hogy vizsgált események közül a füstképződés ennél a mintánál jelent meg a legalacsonyabb hőmérsékleten, 105°C -on, viszont itt is a kötőanyag kezdett füstölni. Az elszíneződés szintén alacsonyabb hőmérsékleten következett be, de izzás vagy láng ebben az esetben sem jött létre, így a vizsgálat sikeresnek volt tekinthető. A vizsgálat a 9. képen látható körülmények közepette zajlott.

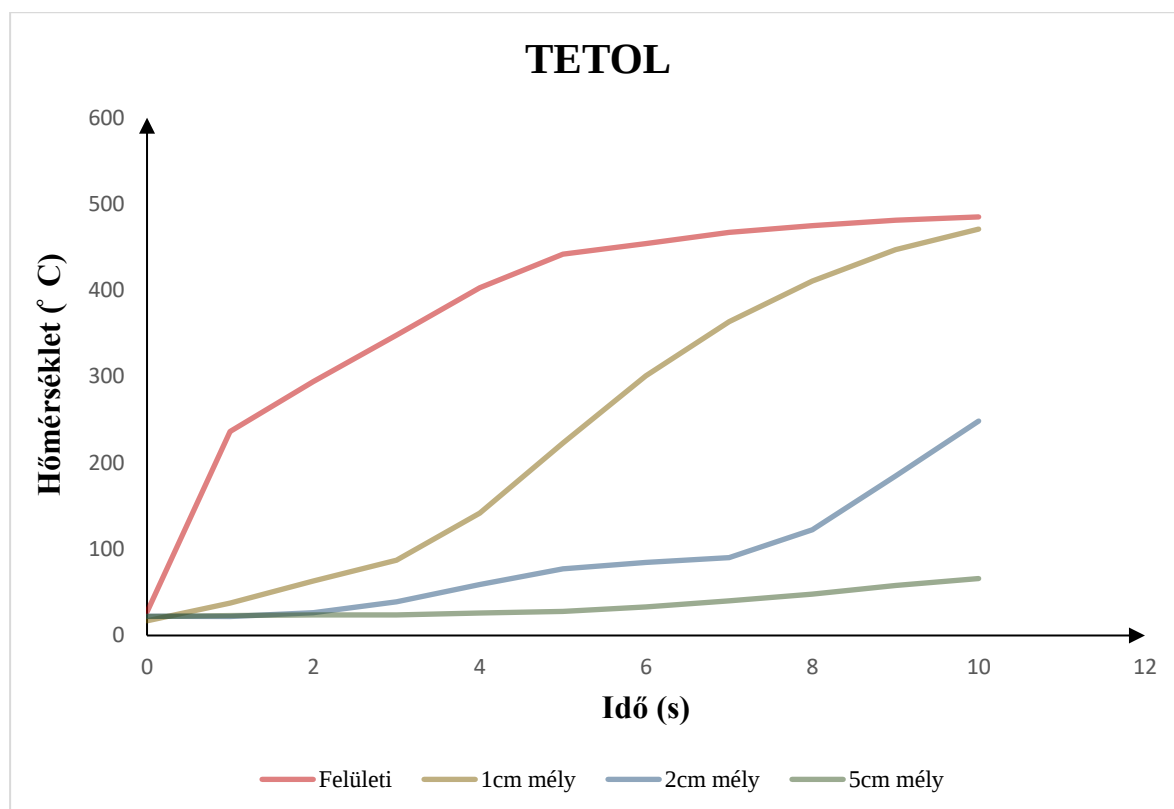


9. kép – Foszfor alapú szerrel égéskésleltetett minta vizsgálata. Saját kép

TETOL minta

A TETOL égéskésleltető szintén kereskedelmi forgalomban kapható égéskésleltető favédő szer. A TETOL-os minta szórásos technológiával lett kezelve.

A hőmérséklet eloszlás ennél a mintánál is egyenletesnek tekinthető. A felületi hőmérséklet nem éri el az 500°C -t. Az 1cm mélyen lévő elem hasonló maximális értéket mér, azonban 2cm mélyen már 300°C alatt marad a hőmérséklet, 5cm mélyen pedig a maximális mért érték 66°C . A termoelemek által kirajzolt hőmérsékleti profil a 8. ábrán látható.



15. ábra - TETOL minta hőmérséklet-idő diagram. Saját forrás

A vizsgálat 10 perce alatt a hőmérséklet a belső rétegekben nem nőtt jelentősen, így az előző elemekhez hasonlóan a TETOL-lal kezelt minta is megőrizte a hőszigetelő képességét a kísérlet során. A megfigyelt eseményeknél feljegyzett hőmérsékleteket és az ehhez szükséges időt az 5. táblázat tartalmazza.

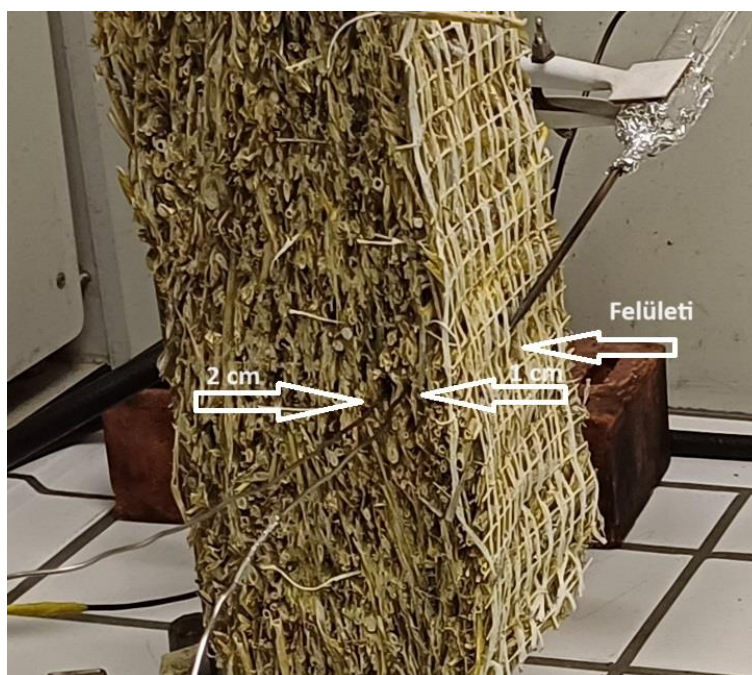
6. táblázat - TETOL minta mérési eredmények. Saját forrás

	Hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$)	Idő (sec)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	127	28	7
Elszíneződés	153	35	7
Izzás kezdete	-	-	7

Ennél a mintánál volt megfigyelhető a leggyorsabban az elszíneződés, a füst is viszonylag hamar és alacsony hőmérsékleten megjelent, ám ugyanúgy a szövetháló kezdett füstölni, mint az előző mintáknál. Izzás ebben az esetben sem jelentkezett.

4.3.3. Változó távolságú sugárzó hő – kezelt minták

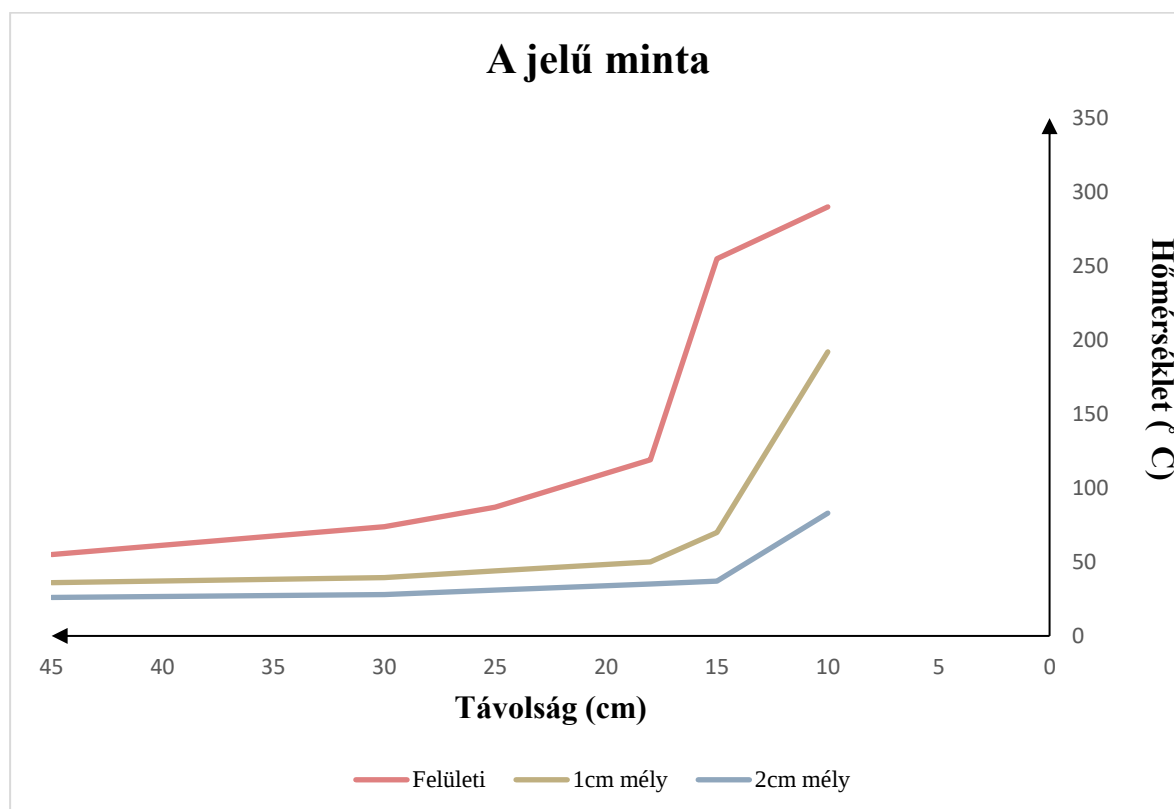
A változó távolságú sugárzó hőre vizsgált elemeknél a felhasznált égéskésleltetők a következő anyagokat tartalmazzák: alumínium-trihidrát, bórax, bórsav, víz, vízüveg, trisó. Az adalékanyagok pontos mennyiségét üzleti titok miatt nem áll módomban ismertetni, azonban az egyes mintákhoz felhasznált összes adaléksúlyt igen. Ez az adat eltérő volt az egyes minták esetében, így lehetőség van ezeknek az adatoknak az összehasonlítására és az égéskésleltetésre kifejtett hatásuknak az elemzésére. A vizsgálat során amint az adott távolságban lévő sugárzó hőforrás hatására a termoelemekeken mért hőmérséklet egyensúlyi állapotba került, nem emelkedett tovább, a hőforrást az egyel közelebbi mérési pontra helyeztem és folytattam a mérést, ameddig az egyensúly ismét bekövetkezett. A vizsgálatokhoz 3 termoelemet használtam a 10. képen látható elrendezés szerint. A felületen, 1cm mélyen a mintában, illetve 2cm mélyen a mintában elhelyezve. A mintát ezen méréseknél is a kötőanyaggal borított felületével fordítottam a hőforrás felé, hogy a valós képet kapjuk az így gyártott szalmatáblák éghetőségi tulajdonságairól.



10. kép - Termoelemek elhelyezkedése változó távolságú sugárzó hő vizsgálatok során. Saját kép

A jelű minta

A felhasznált égéskésleltetők: alumínium-trihidrát, bórax, bórsav, csiriz, víz. A felhasznált égéskésleltető összes súlya: 84,40 gr. A minta szórásos technológiával lett kezelve. A kezdeti 45cm távolságról indított és fokozatosan közelített sugárzó hőforrás és annak hatása a felületi, 1cm mélyen, valamint 2cm mélyen elhelyezett termoelemre az alábbi (9.) ábrán látható.



16. ábra – Hőmérséklet-távolság diagram A jelű minta. Saját kép

A diagramon az látható, hogy a felületi hőmérséklet 18cm távolságig alacsony intenzitással nő, 18cm-en belül viszont meredeken emelkedésnek indul. A minta belsejében elhelyezett termoelemekeken mér hőmérséklet 15cm távolságnál kezd el intenzíven növekedni. A vizsgálatot 5 perc elteltével leállítottam, ugyanis ekkor jelent meg az izzás. A feljegyzett eseményeket és a hozzájuk tartozó hőmérséklet és idő diagramokat a 6. táblázat tartalmazza.

7. táblázat - A jelű minta mérési eredmények. Saját forrás

	Hőmérséklet (°C)	Idő (sec)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	192	260	15
Elszíneződés	210	283	10
Izzás kezdete	290	315	10

Az adatokból az látszik, hogy a füstképződés viszonylag magas hőmérsékleten kezdődik meg az előző mintákhoz képest, azonban ami nagyon fontos, hogy ebben az esetben izzás is bekövetkezik 290 °C-on. A minta ennek ellenére nem gyulladt meg, a mérés végeztével az izzás megszűnt.

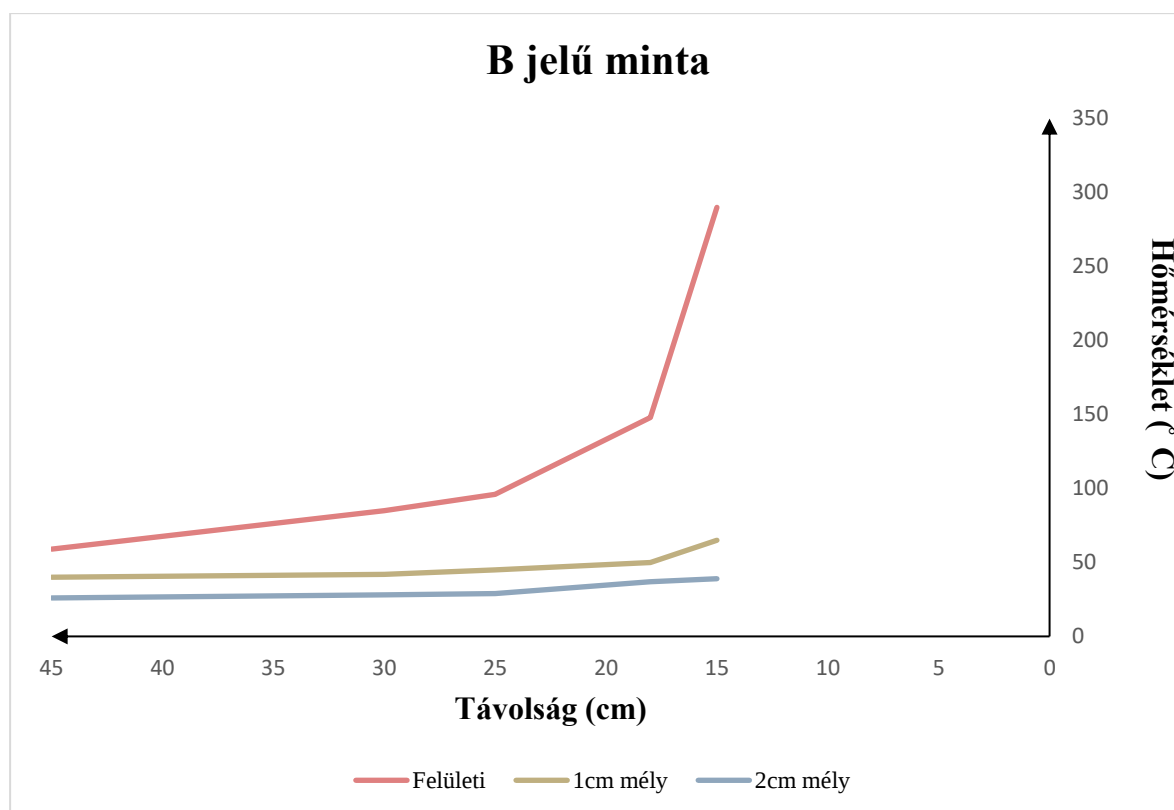


11. kép - A jelű minta felülete a vizsgálat végeztével. Saját kép

B jelű minta

A felhasznált égéskésleltető összes súlya: 84,20 gr. A minta szintén szórásos technológiával lett kezelve.

A felhasznált égéskésleltető mennyiség hasonló, mint az A jelű minta esetében, azonban a sugárzó hőre adott reakció kissé eltérő. A mérést 300 sec után 15cm-es távolságnál leállítottam, mert a próbatest izzani kezdett.



17. ábra - Hőmérséklet-távolság diagram B jelű minta. Saját forrás

A felületi hőmérséklet nem érte el az előző mintáknál tapasztalt hőmérsékletet, ennek ellenére a 10cm-es távolság elérése előtt a minta izzást produkált. Ez azt jelenti, hogy a B jelű mintánál alkalmazott összetétel az égéskésleltető tekintetében nem olyan hatékony, annak ellenére a belső rétegek felmelegedése nem volt itt sem jelentős.

8. táblázat - B jelű minta mérési eredmények. Saját forrás

	Hőmérséklet (° C)	Idő (sec)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	193	230	15
Elszíneződés	215	240	15
Izzás kezdete	288	300	15

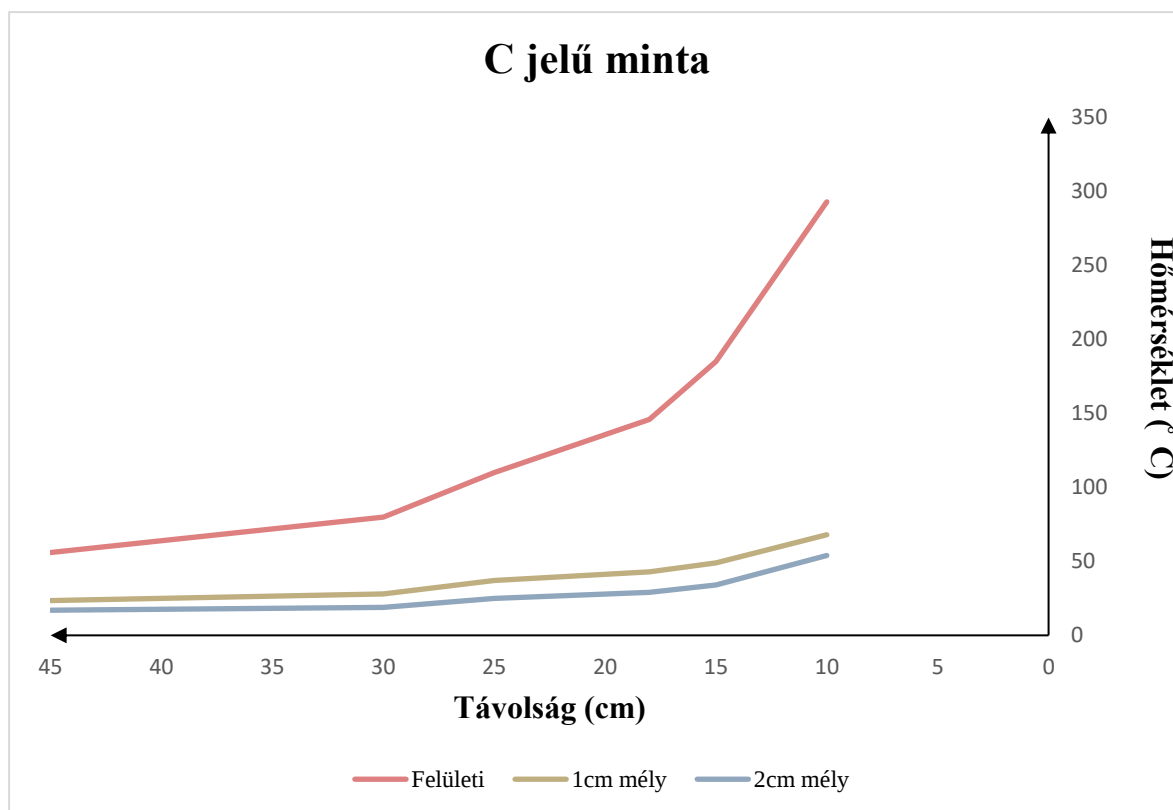
A füst megjelenése és az elszíneződés hasonló hőmérsékleten jelentkezett, mint a hasonló mennyiségű, de eltérő összetételű A jelű minta esetében, azzal a különbséggel, hogy a minimális távolság 15cm volt. Az izzás kezdete 288 °C-nál következett be a felületen, 15cm-re lévő hőforrás hatására. Ez lényegében megegyezik az A jelű mintánál mért 290 °C-os értékkel, azonban abban az esetben 10cm-re lévő hőforrásra volt ehhez szükség.



12. kép - B jelű minta felülete a vizsgálat végeztével. Saját kép

C jelű minta

A felhasznált égéskésleltetők összes súlya: 168,80 gr. A minta szintén szórásos technológiával lett kezelve.



18. ábra – Hőmérséklet-távolság diagram C jelű minta. Saját forrás

A fenti ábrán látható, hogy a nagyobb mennyiségű égéskésleltető alkalmazása jó hatással van a belső rétegekben való hőterjedésre. A felületi hőmérséklet lényegében hasonló, azonban az 1cm mély és 2cm mély termoelemek jelentősen alacsonyabb hőmérsékleteket mérnek, mint az előző minta esetében.

A felületi hőmérséklet szintén 18cm távolságban kezd el meredeken emelkedni. A belső rétegekben 15cm-nél tapasztalható meredekség növekedés, azonban ez nem jelentős.

9. táblázat - C jelű minta mérési eredmények. Saját forrás

	Hőmérséklet (°C)	Idő (sec)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	160	150	15
Elszíneződés	220	330	10
Izzás kezdete	359	520	10

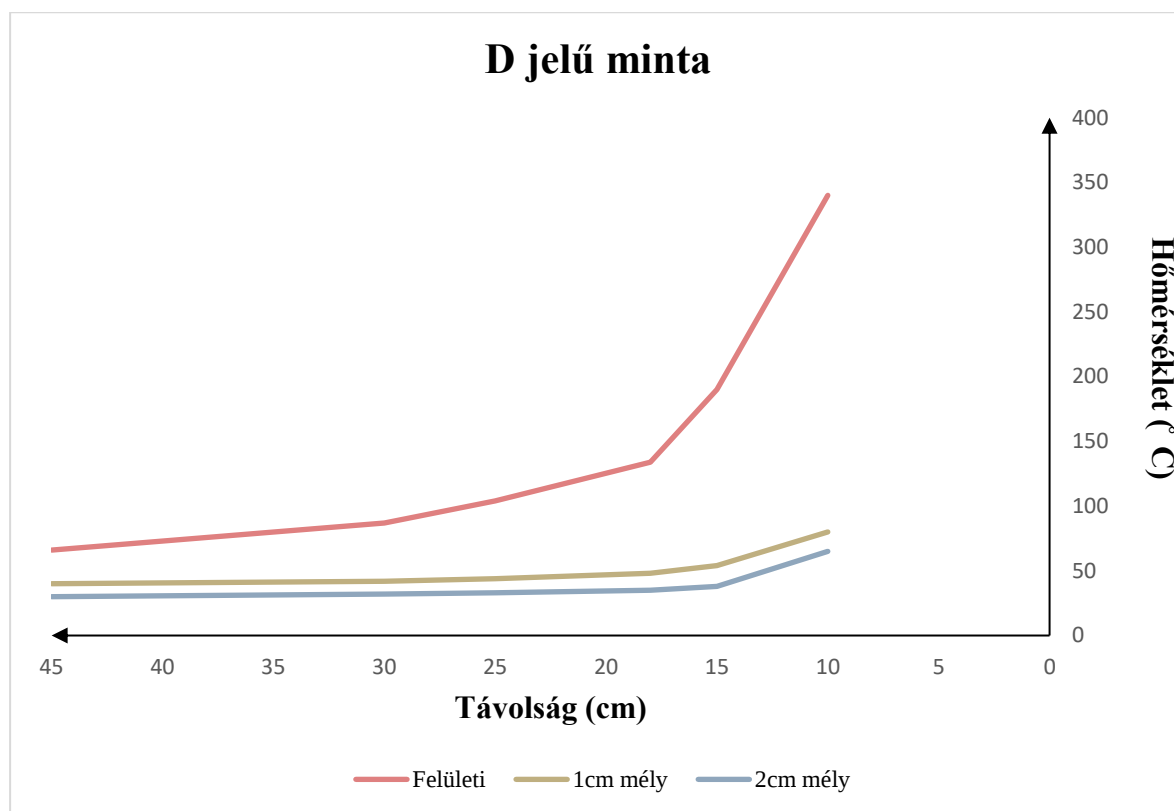
A mérési eredményekből az látszik, hogy a füstképződés alacsonyabb hőmérsékleten és gyorsabban megindult, mint az A jelű mintánál, az elszíneződés hasonló hőmérsékleten, de lassabban következett be végül az izzáshoz jóval több időre és magasabb hőmérsékletre volt szükség. A minta a mérés során nem gyulladt meg, az izzás a mérés leállítása után megszűnt. A szórt minták közül egyértelműen ez teljesített a legjobban, tehát az égéskésleltető ilyen mennyiségben történő felhasználásánál a 80gr-nyi differencia jelentős eltérést okoz.



13. kép - C jelű minta felülete a vizsgálat végeztével. Saját kép

D jelű minta

A felhasznált égéskésleltető összes súlya: 249,30 gr. A minta áztatásos technológiával lett kezelve, tehát teljes keresztmetszetében égéskésleltetett.



19. ábra - Hőmérséklet-távolság diagram D jelű minta. Saját forrás

A diagramról azt olvashatjuk ki, hogy az áztatott minta, mely több, mint 50%-kal nagyobb mennyiségű égéskésleltető felhasználásával készült, hasonló hőmérsékleten kezdett el izzani, mint a C jelű, szórt minta. A különbség abban jelentkezett, hogy míg a C jelű mintánál 520 sec idő volt szükség az izzás eléréséhez, addig a D jelű minta esetében ez az idő 750 sec a felületen elhelyezett termoelem esetében.

10. táblázat - D jelű minta mérési eredmények. Saját forrás

	Hőmérséklet (°C)	Idő (sec)	Távolság (cm)
Füst megjelenése	215	570	15
Elszíneződés	240	640	15
Izzás kezdete	340	750	10

Látható, hogy ugyan nagyobb mennyiségű égéskésleltetőt igényel, az áztatásos technológia jobb eredményeket produkál a szórt mintákhoz képest. A füst megjelenéséhez szükséges idő is jóval nagyobb, mint a szórt minták esetében, jellemzően több, mint a duplája. Az elszíneződés megjelenéséhez szükséges idő is jelentősen megnőtt.

A fentiek fényében az látszik, hogy az áztatásos technológia ugyan nagyobb anyagigényű, viszont jelentősen jobb eredményeket is produkál.



14. kép - D jelű minta felülete a vizsgálat végeztével. Saját kép

4.3.4. Összefoglaló táblázat

A mérési eredményeket az áttekinthetőség céljából az alábbi, 10-es számú táblázatban összesítem. Az eredményekből az olvasható ki, hogy a különböző égéskésleltetők használatával a szalma próbatestek ellenállóképessége a sugárzó hővel szemben javítható. A szórásos és az áztatásos technológia közül egyértelműen az áztatásos, ami jobb eredményeket produkál. Ezen a ponton ki kell emelni, hogy a száradási idő jóval nagyobb, mint a szórt minta esetében, a kapott áztatott minták 3 napot száradtak a telephelyen. A füstképződés tekintetében ki kell emelni, hogy a natúr vagy kezeletlen minta nem a kötőanyaggal átszőtt oldalával a hőforrás felé került tesztelésre, hogy konkrétan a szalmára vonatkozó értéket kapjunk. Az égéskésleltetett próbatestek esetében a hőforrás felé fordítottam a kötőanyaggal átszőtt oldalt, annak érdekében, hogy magáról a kialakításról valós képet kapjunk. Így lehetséges, hogy néhány kezelt minta esetében alacsonyabb hőmérsékleten indult meg a füstképződés, hiszen ezeknél a kötőanyag kezdett el füstölni. Az elszíneződés, mint az izzás előtti utolsó megfigyelhető jelenség is az égéskésleltetők hatására lassabban következik be, az izzás maga

pedig bizonyos esetekben teljesen elkerülhető akár 400 – 500 °C hőmérsékleti tartományokban is.

11. táblázat - Összefoglaló táblázat. Saját forrás

Minta jele	Távolság	Minta típusa	Füstképződés (°C) / (s)	Elszíneződés (°C) / (s)	Izzás (°C) / (s)
Kezeletlen	14cm	kezeletlen	145 °C	160 °C	190 °C
BOCH	7cm	áztatott	130 °C / 29 s	252 °C / 65 s	-
Foszfor alap.	7cm	szórt	105 °C / 17 s	223 °C / 52 s	-
TETOL	7cm	szórt	127 °C / 28 s	153 °C / 35 s	-
A jelű minta	változó	szórt	190 °C / 260 s	210 °C / 283 s	290 °C / 315 s
B jelű minta	változó	szórt	193 °C / 230 s	215 °C / 240 s	288 °C / 300 s
C jelű minta	változó	szórt	160 °C / 150 s	220 °C / 230 s	359 °C / 520 s
D jelű minta	változó	áztatott	215 °C / 570 s	240 °C / 640 s	340 °C / 750 s

Ha a mért időtartamokat tekintjük, akkor szintén az látható, hogy az áztatásos technológia lassítja a folyamatot és hatására a füstképződés, elszíneződés, izzás később következik be. A változó távolságú sugárzó hő kisebb igénybevételt jelent, mert 45cm-es távolságból indul a mérés, ennek hatására a megfigyelt folyamatok is lassabban játszódnak le. Jól mutatja azonban, hogy egy 650 °C-os hőforrás 20cm-nél nagyobb távolságban már nem gyakorol intenzív hatást a szalmára, a mérési értékek alapján 20-15cm távolságnál kezd el a hő a szalma felületén és a belső rétegekben is felszökni.

5. KÖVETKEZTETÉS ÉS MÉRNÖKI JAVASLATOK

A szalma építőipari felhasználása nagy múltra tekint vissza. Ennek az oka, hogy remek tulajdonságai vannak, nagy számban előforduló, természetes alapanyag. Mindezek ellenére a jelenkori építőipari felhasználása egyre csekélyebb. A szalma tűzvédelmi szempontból nem osztályozott, F tűzvédelmi osztályú anyagnak tekintendő a hatályos jogszabályok szerint.

A szakirodalmi kitekintésből láthattuk, hogy a bálázott szalma és a szálas szalma tűzzel szembeni viselkedése eltérő. A bálázott szalma az égése során egy elszenesedett réteget képez, ami védi a belső rétegeket a hőtől, így a fához hasonlóan lassítja az égést. Minél nagyobb a bála testsűrűsége, annál nagyobb az ellenállóképessége a tűzzel szemben. Ez a kezeletlen, natúr szalmára is igaz, ez a tulajdonság égéskésleltető szer alkalmazásával tovább növelhető.

A szakirodalomban számos olyan tudományos munkát találhatunk, ami a szalma égéskésleltetését vizsgálja, de ezek jellemzően nyílt lángnak valló ellenállásról írnak. A sugárzó hőnek való ellenállás nem szerepel a vizsgálatok között, holott a fenti kísérletekből látható, hogy a láng megjelenése előtti hőmérsékleti zónákban is megindul a termikus bomlási reakció. A kezeletlen szalma sugárzó hővel szembeni ellenállása alapvetően nem túl jó (145°C – füstképződés és 190°C – izzás), de javítható. Az égéskésleltetők használata módszertől függően többszörösére növeli a szalma ellenálló képességét. Az áztatásos módszer jobb eredményeket mutat, azonban a nagyobb anyagigénye miatt nem gazdaságos és a szárítási folyamat is hosszadalmas.

Természetesen az általam elvégzett mérések száma nem elégséges végső konklúzió levonásához, ezért ahhoz, hogy tisztább képet kapjunk a szalma megfelelő égéskésleltetéséről további vizsgálatok szükségesek. Véleményem szerint mindenképp szükséges vizsgálni a sugárzó hő hatását a szalmára, valamint a vizsgálati eredményeket más, szabványos vizsgálatokkal összehasonlítani és ezek ismeretében meghatározni olyan anyagokat és kezelési eljárásokat, amelyek használatával javítható a szalma tűzzel szembeni viselkedése.

A szalma a felhasználását tekintve nem, mint önálló építőelem jelenik meg a leggyakrabban, hanem mint hőszigetelő elem és mint ilyen, egy meghatározott rétegrend része. A meghatározott rétegrend pedig szintén lehet egy vizsgálat tárgya, így biztosítva szabályos felhasználást a szalmának.

Szakdolgozatomban nem térek ki a különböző szalmafajták vizsgálatára, azonban ezen megfontolást is mindenképp figyelembe kell venni a szalmánál, hiszen az különböző növényekből nyert szalmák különböző szerkezetűek, ezáltal különböző a tűzzel szembeni viselkedésük. Az egyik legnagyobb probléma a szalma felhasználásával kapcsolatban ez a

tényező, a nagy szórás a minőséget tekintve. Ez persze a természetes anyagok velejárójaként is felfogható, azonban a tűzvédelmi besorolást nagyban nehezíti.

Szintén megemlítendő a szalma gyakorlati felhasználása esetén, hogy gondoskodni kell a rovarok, rágcsálók, kártevők elleni védelemről. Ez a megközelítés ugyan igaz egyéb hőszigetelő anyagokra is, azonban nem megkerülhető kérdés a szalmánál sem. Jellemzően, ha megfelelő mechanikai védelemmel (pl.: vakolat) rendelkezik a rétegrend, akkor ez a kérdés megoldott.

Fontosnak tartom kiemelni azt a tényt is, hogy ugyan a szakdolgozatom a szalma tűzzel szembeni viselkedésének megismerésére, lehetőség szerinti javítására koncentrál, a gyakorlatban alkalmazott hőszigetelési megoldások nagy része égésgátló szerek hozzáadása nélkül könnyen éghetőek, pl.: EPS égésgátló hozzáadása nélkül F osztály, PU (PIR) habok többsége E, D osztály. [<https://www.rockwool.com/hu/inspiralo-ismeretek/a-kozetgyapot-elonyei/tuzvedelem-kozetgyapottal/tuzvedelmi-osztalyok/>, letöltés: 2024.03.20. 19.27]

Összességében elmondható, hogy a szalmában rejlő potenciál távolról sincs kihasználva pedig a benne rejlő lehetőség adott.

6. HIVATKOZÁSOK

Szakirodalom

- A. MUKHERJEE, B. KARMAKAR, G. HALDER [2020] Response surface optimized free radical grafting of methyl methacrylate on delignified rice straw for evaluating its application potential as flame retardant roofing material. Chemical Engineering Journal Advances 1 (2020)
- G. MINKE, B. KRICK [2012] Szalmabála építés, Cser kiadó
- HORVÁTH N. [2008] A termikus kezelés hatása a faanyag tulajdonságaira, különös tekintettel a gomabállóságra, Doktori (Ph.D.) értekezés, NyME
- KOLTAI L. [2009] Papíripari cellulózrostok kolloidkémiai szerkezetének vizsgálata, Doktori (Ph.D.) értekezés, NyME
- LUBLÓY É., MÓDER I., TAKÁCS L. [2010] Szalmabála anyagú falak tűzvédelmi kérdései, Építőanyag folyóirat 2010/4. 62. évf. 4. szám
- N. BELAYACHI, D. HOXHA, B. ISMAIL [2017] Impact of fiber treatment on the fire reaction and thermal degradation of building insulation straw composite, Science Direct (2017)
- T. ZHANG, Y. LU, Z. LU [2023] A flame-retardant corn straw brick (FRCSB): Thermal stability, flammability and flame-retardant mechanism. Construction and Building Materials 401 (2023)

Internetes hivatkozások

<https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/climate-change/>,

kereső: www.google.hu, kulcsszavak: eu, klímasemlegesség, 2050, letöltés: 2024.03.07.

<https://kozetgyapotarak.hu/rockwool/szigeteloanyag-hoatbocsatasi-tenyezo/>,

kereső: www.google.hu, kulcsszavak: hővezetési tényező, közetgyapot, letöltés: 2024.03.20.

https://lakcimke.energiaklub.hu/sites/default/files/szigetelési_megoldások_knaufinsulation.pdf,

kereső: www.google.hu, kulcsszavak: páradiffúziós ellenállási tényező, letöltés: 2024.03.20.

<https://www.nordikal.hu/letolt/epuletfizika.pdf>,

kereső: www.google.hu, kulcsszavak: hővezetési tényező, letöltés: 2024.03.20.

http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/anal/BSc-Analitikai-es-Szerkezetvizsgalati-Szaklabor/Termikus-analízis_jegyzet_1999.pdf;

kereső: www.google.hu, kulcsszavak: termikus analízis, letöltés: 2024.05.01.

<https://ojs.mtak.hu/index.php/vedelemtudomany/article/view/13014/10492>,

kereső: google.hu, kulcsszavak: LOI, oxigén index, mérés, letöltés: 2024.05.03.

<https://www.etscablecomponents.com/blog/2014/05/ul94-flammability-rating-mean/>;

kereső: google.hu, kulcsszavak: UL94 V, vertical burning test, letöltés: 2024.04.12.

<https://www.rockwool.com/hu/inspiralo-ismeretek/a-kozetgyapot-elonyei/tuzvedelem-kozetgyapottal/tuzvedelmi-osztalyok/>,

www. google.hu, kulcsszavak: tűzvédelmi osztály, hőszigetelés, letöltés: 2024.03.20.

Szabványok

EN ISO 11925-2: (2020) Tűzveszélyességi vizsgálatok. Építési célú termékek gyúlékonysága közvetlen lánghatás mellett. 2. rész: „Egyedi láng”-os vizsgálat

DIN 4102 Építőanyagok és elemek tűzállósága