

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET
VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK

MEZŐGAZDASÁGI HULLADÉKOK ENERGIASÚRÚSÉG-NÖVELÉSÉNEK VIZSGÁLATA

PH. D. ÉRTEKEZÉS

Készítette:
SZAMOSI ZOLTÁN

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK SZAKTERÜLET
TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

A doktori iskola vezetője:

Dr. Tisza Miklós
a műszaki tudományok doktora

Témacsoport vezetője:

Dr. Czibere Tibor
az MTA rendes tagja

Témavezető:

Dr. Siménfalvi Zoltán
egyetemi docens

Társ-témavezető:

Dr. Lakatos Károly†
egyetemi docens

MISKOLC
2016

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK	2
EREDETISÉGI NYILATKOZAT	4
TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS	5
JELÖLÉSJEGYZÉK	6
ÁBRAJEGYZÉK	9
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	12
2. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK	15
2.1 MECHANIKUS ELJÁRÁSOK	15
2.1.1 Brikettálás.....	15
2.1.2 Pelletálás	16
2.2 TERMIKUS ELJÁRÁSOK	16
2.2.1 Pirolízis.....	17
2.2.2 Torrefaction.....	19
3. DIFFERENCIÁL TERMOGRAVIMETRIAI VIZSGÁLATOK	24
3.1. A VIZSGÁLATI ELJÁRÁS	24
3.2. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK	25
3.3 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE	28
4. BIOMASSZA PÖRKÖLÉSE VÁKUUMBAN	29
4.1 KÉSZÜLÉK LEÍRÁSA	29
4.2 A VIZSGÁLATI ELJÁRÁS	30
5. AZ ALAPANYAGOK ÉS A PÖRKÖLÉS EREDMÉNYEZTE TERMÉKEK TÜZELÉSTANI PARAMÉTEREINEK ELEMZÉSE	32
5.1 KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK MÓDSZERE	32
5.2 KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYE.....	32
5.3 NUMERIKUS MÓDSZER A HŐTARTÁSI IDŐ-FŰTŐÉRTÉK KAPCSOLAT MEGHATÁROZÁSÁRA	36
6. A PÖRKÖLÉS ENERGETIKAI SZÁMÍTÁSA ÉS VIZSGÁLATA	39
7. AZ EREDETI ÉS HŐKEZELT MINTÁK HAMU LÁGYULÁSI JELLEMZŐINEK VIZSGÁLATA	45
7.1 A HAMU LÁGYULÁSI HŐMÉRSÉKLETÉNEK VIZSGÁLATA	45
7.1.1 Vizsgálati eljárás	45
7.1.2 Mérési eredmények elemzése	47
7.1.3 A mérési eredmények összegzése	49
7.2 ELEKTRONMIKROSKÓPOS VIZSGÁLAT	50
7.2.1 Vizsgálati eljárás	50
8. VISSZANEDVESEDÉSI VIZSGÁLATOK	78
9. AZ ALAPANYAG PORROBBANÁSI TULAJDONSÁGAINAK MEGHATÁROZÁSA	79
9.1. PORROBBANÁSOK MECHANIZMUSA	79
9.1.1. Robbanási jellemzők.....	80
9.1.2. A robbanási jellemzőket befolyásoló tényezők.....	81
9.2. A KSEP 7.0 VIZSGÁLÓ BERENDEZÉS	85
9.3. VIZSGÁLATOK RENDSZERE	87
9.3.1. Vizsgálati eljárás	87

9.3.2. Robbanási jellemzők meghatározása (p_{max} , K_{max}).....	88
9.4. KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK	89
9.4.1. Nedvességtartalom meghatározása	89
9.4.2. Szemcseeloszlás meghatározása	90
9.4.3. Búzaszalma és pörkölt búzaszalma robbanási jellemzőinek vizsgálata.....	93
9.4.4. Repceszalma és pörkölt repceszalma robbanási jellemzőinek vizsgálata.....	94
9.4.5. Szőlővenyige és a pörkölt szőlővenyige robbanási jellemzőinek vizsgálata	94
10. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA, GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁG ÉS A KUTATÁSI TÉMA TOVÁBBFEJLESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI	98
11. SUMMARY	99
12. TÉZISEK, TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	100
13. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	101
14. A KUTATÁSI TÉMÁBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK.....	102
15. IRODALOMJEGYZÉK	103

Eredetiségi nyilatkozat

Alulírott *Szamosi Zoltán* büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a „*Mezőgazdasági hulladékok energiasűrűség-növelésének vizsgálata*” című, a Miskolci Egyetemen működő Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolába beadott PhD értekezés önálló munkám eredménye, az irodalmi hivatkozások egyértelműek és teljeseek.

Kelt: Miskolc, 2015. szeptember 1.

Szamosi Zoltán
doktorjelölt

Témavezetői ajánlás

Szamosi Zoltán a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán 2009-ben Gépészmérnöki BSc szakon jó minősítéssel, majd 2011-ben Gépészmérnöki MSc szakon kiváló minősítéssel szerzett kitüntetéses diplomát. Doktori képzését 2011. februárjában kezdte, a három éves időszak alatt teljesítette az abszolutórium feltételeit, elindította doktori eljárását és elkészítette doktori értekezését. Kiváló, egyenletes tanulmányi teljesítményét mutatja, hogy a PhD abszolutóriumot 212,5 kreditponttal teljesítette.

2014. februárjától az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézetben tanársegédként dolgozik. Már a doktori képzés időszakában bekapcsolódott az intézeti tanszék oktatási tevékenységébe. A Vegyipari technológiák és gépeik, a Vegyipari technológiák, az Ipari technológiák című tantárgyak, az Environmental Management és a Pressure Vessel Design angol nyelvű külföldi hallgatóknak meghirdetett tárgyak oktatásában, konzultációjában vesz részt, tanársegédként ezen tárgyak felelős vezetője. Kiemelkedő a hallgatókkal kapcsolatos konzultációs tevékenysége, számos szakdolgozat, diplomaterv és TDK dolgozat konzulense volt.

Folyamatosan részt vesz intézeti kutatásokban, ezek révén igen sok, az értekezés készítése során is hasznosítható, gyakorlati tapasztalat birtokába jutott. Jelenleg is több projekt résztvevője (TÁMOP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0017 InterTeam; TÁMOP 4.2.1C-14/1/Konv-2015-0012 Miskolc-Egyetemváros 2015 - TudásPark) és előkészítés alatt álló GINOP pályázat közreműködője. Összesen 13 cikk szerzője melyek közül hét folyóirat cikk (öt hazai, két külföldi folyóiratbeli) és hat konferencia kiadványban megjelent (egy hazai és öt nemzetközi konferencia kiadványbeli) publikáció.

„*Mezőgazdasági hulladékok energiasűrűség-növelésének vizsgálata*” című PhD értekezését folyamatos munkával készítette el. Az elkészített értekezés egyik legnagyobb értékének azt tartom, hogy a tudományos kutatások eszközszerével, tudatos és jól megválasztott alkalmazásával a mindennapi gyakorlat számára is hasznosítható eredményekhez vezetett.

Szamosi Zoltán emberileg, oktatóként és kutatóként is kiváló kolléga, eddigi tudományos tevékenységével, PhD értekezésének elkészítésével az önálló, alkotó tudományos tevékenység végzésére való alkalmasságát messzemenően bizonyította.

Összefoglalva, az elkészült értekezést tartalmi és formai vonatkozásban igényesnek tartom, a jelölt eredményes munkája közvetett bizonyítéka a Karon folytatott doktori képzés magas színvonalának.

Kelt: Miskolc, 2015. december 2.

Jelölésjegyzék

LATIN BETŰS JELÖLÉSEK

c	A víz fajhője	[J/kgK]
$C_{szilárd}$	A töltet fajhője	[J/kgK]
$C_{víz}$	A víz fajhője	[J/kgK]
C_{plev}	A levegő állandó nyomáson vett fajhője	[J/kgK]
C_{pg}	A vízgőz állandó nyomáson vett fajhője	[J/kgK]
DTG	Differenciál termogravimetria	[-]
DTA	Differenciál termikus analízis	[°C]
DT	Deformációs pont	[°C]
$(dp/dt)_m$	A robbanás nyomás/idő görbéjének w_p inflexiós pontjában a görbe (maximális) meredeksége egy adott koncentrációnál	[bar/s]
$(dp/dt)_{max}$	A különböző koncentráció értékek mellett kapott $(dp/dt)_m$ értékek maximuma.	[bar/s]
E	A befektetett energia	[MJ]
FT	Folyási hőmérséklet	[°C]
H	Az elemzési minta hidrogéntartalma	[m/m %]
$H_{alapanyag}$	Az alapanyag fűtőértéke	[MJ/kg]
H_a	Égéshő	[J/g]
$H_{pörkölt}$	A pörkölt tüzelőanyag fűtőértéke	[MJ/kg]
$H_{pirogáz}$	A felszabaduló pirogáz fűtőértéke	[MJ/kg],
H_u	Fűtőérték	[J/g]
HT	Félgömb hőmérséklet	[°C]
i	A rendszer fajlagos entalpiája	[J/kg]
i_1	A rendszer fajlagos entalpiája kiindulási állapotban	[J/kg]
i_2	A rendszer fajlagos entalpiája végállapotban	[J/kg]
$i_{kilépő}(\tau)$	A kilépő gáz fajlagos entalpia változása	[J/kg]
I_{R1}	A rendszer entalpiája kiindulási állapotban	[J]
I_{R2}	A rendszer entalpiája végállapotban	[J]
I	Egységmátrix	[-]
IE	Gyújtó energia	[kJ]
IT	Szintereződi hőmérséklet	[°C]
$J(x)$	Jacobi-mátrix	[-]
$J(x)^T$	Jacobi-mátrix transzponáltja	[-]
K_{max}	Térfogatfüggetlen nyomásnövekedési sebesség	[barm/s]
LEL	Alsó robbanási határérték	[g/m ³]
LOC	Korlátozó oxigén koncentráció	[V/V%]
m	A víz tömege	[kg]
$m_{alapanyag}$	Az alapanyag tömege	[kg]
MIE	Minimális gyújtási energia	[J]
$m_k(p)$	Modellfüggvény	[-]
$\dot{m}_0(\tau)$	A töltet tömegének változása	[kg/s]
$\dot{m}_{összes}$	A töltet kiindulási tömegárama	[kg/s]
$m_{pörkölt}$	A pörkölt tüzelőanyag tömege	[kg]
$m_{pirogáz}$	A felszabaduló pirogáz tömege	[kg]
m_{sz}	A száraz levegő tömege	[kg]
m_T	A töltet tömege a felfűtés végén	[kg]
p	A rendszer össznyomása	[Pa]

p_d	A tartály expanziós nyomása: a pre-vákuum és a normál légköri nyomás különbsége. A szokásos érték $-0,6 \text{ bar}_g$.	[bar]
p_{ex}	Robbanási túlnyomás: a gyújtás előtti (normál) nyomás és a robbanás alatt elért maximális nyomásérték különbsége a 20 literes készülékben egy adott koncentrációnál.	[bar]
$p_{gtel} (T)$	A vízgőz telítési nyomása	[Pa]
p_k	Környezeti nyomás	[mbar]
p_{L1}	A rendszer nyomása kiindulási állapotban	[Pa]
p_{L2}	A rendszer nyomása végállapotban	[Pa]
p_m	Korrigált robbanási nyomás: a 20 literes készülékben a kémiai gyújtók használatával összefüggő hűtési és nyomással kapcsolatos jelenségek miatt a mért p_{ex} értéket helyesbíteni kell	[bar]
p_{max}	Maximális robbanási túlnyomás érték: különféle koncentrációval elvégzett mérésorozat p_m értékeinek maximuma	[bar]
$p_{red,max}$	Redukált nyomás maximális értéke	[bar]
p_{stat}	Hasadófelület nyitónyomása	[bar]
$p_{\ddot{u}}$	Üzemi nyomás	[mbar]
p^{GN}	Gauss-Newton-féle közelítés megoldása	[-]
p^{LM}	Levenberg-Marquardt-féle közelítés megoldása	[-]
Q	A víz felmelegítéséhez szükséges hőenergia mennyisége	[W]
$Q_{\text{felfűtés}}$	A búzaszalma pörkölési hőfokra való felfűtésének energia szükséglete	[kJ]
$R_{g\ddot{o}}$	A vízgőz gázállandója	[J/kgK]
r_o	A víz párolgáshője	[J/kg]
$r_j(x)$	Tetszőleges vektor a függvény egy pontjára mutatva	[-]
R_{lev}	A levegő gázállandója	[J/kgK]
ST	Gömb hőmérséklet	[°C]
$St1$	Robbanóképes por	[-]
$St2$	Erősen robbanóképes por	[-]
$St3$	Nagyon erősen robbanóképes por	[-]
t_1	Az égés időtartama, azaz a gyújtástól a maximális nyomásérték bekövetkezéséig mért idő	[ms]
t_2	Begyulladás idő: a gyújtás időpontjától az inflexiós pontba helyezett érintő egyenes és a 0 bar-os tengely metszéspontjáig terjedő időtartam.	[ms]
t_a	Szelep késleltetési idő: az elektromos szelep aktiválása és a 20 literes gömbben jelentkező nyomásemelkedés kezdete között eltelt idő hossza. 30 és 50 ms között megfelel.	[ms]
t_v	Gyújtás késleltetési idő: befolyásolja a keveredés mértékét	[ms]
T	Hőmérséklet	[°C]
TG	Termogravimetria	[%]
T_1	A rendszer hőmérséklete kiindulási állapotban	[°C]
T_2	A rendszer hőmérséklete végállapotban	[°C]
V	Leszívandó térfogat	[m ³]
V_{lesz}	Leszívási teljesítmény	[m ³ /h]
V_{nL}	A nedves levegő térfogata	[m ³]
V_R	A rendszer térfogata	[m ³]
W	Az elemzési minta nedvességtartalma	[m/m %]
x	A rendszer abszolút nedvességtartalma	[kg/kg száraz levegő]

x_{L1}	<i>A rendszer abszolút nedvességtartalma kiinduló állapotban</i>	[kg/kg száraz levegő]
x_{L2}	<i>A rendszer abszolút nedvességtartalma végállapotban</i>	[kg/kg száraz levegő]
x_{50}	<i>Szemcsehalmaz medián szemcsemérete</i>	[mm]
24,42	<i>1% nedvességnek megfelelő korrekciós tényező 25°C mérési hőmérsékleten</i>	[-]
8, 94	<i>A hidrogén átszámítási tényezője vízre</i>	[-]

GÖRÖG BETŰS JELÖLÉSEK

ΔT	<i>Hőmérsékletkülönbség</i>	[°C]
ε	<i>Leszívási tényező</i>	[-]
ϕ	<i>A relatív nedvességtartalom</i>	[-]
η	<i>Volumetrikus hatásfok</i>	[-]
λ	<i>Modellfüggvény sajátértéke</i>	[-]
ρ_m	<i>A töltet anyagsűrűsége</i>	[kg/m ³]
$\sum_{j=1}^m r_j(x) \nabla^2 r_j(x)$	<i>Másodrendű Hesse-tag</i>	[-]
τ_0	<i>A felfűtés kezdeti időpillanata</i>	[s]
τ_1	<i>A felfűtés végső időpillanata</i>	[s]
τ_{nyit}	<i>A szelep kinyitásának időpillanata</i>	[s]
ξ_{n2}	<i>A töltet víztartalma végállapotban</i>	[-]
ξ_{n1}	<i>A töltet víztartalma</i>	[-]

Ábrajegyzék

1. ábra: Különböző anyagú és alakú brikettek	16
2. ábra: A síkmatricás (a) és a hengermatricás (b) pelletáló	16
3. ábra: Egy példa a gyors pirolízis kapcsolására [9]	19
4. ábra: A növényi sejtfalat felépítő polimerek és reakcióképességük a pörkölés során [10]	20
5. ábra: A szilárd tüzelőanyagok elemi hidrogén és oxigén, karbon aránya [14]	21
6. ábra: A búzaszalma TG, DTG és DTA görbéje	25
7. ábra: A repceszalma TG, DTG és DTA görbéje	26
8. ábra: A szőlővenyige TG, DTG és DTA görbéje	27
9. ábra: A mérés kapcsolási vázlata	29
10. ábra: A pörkölő kemence módosított változata	30
11. ábra: Egy példa a hőmérséklet változására mérés közben (búzaszalma hőkezelése 30 percig) ..	31
12. ábra: A kaloriméter metszeti képe	32
13. ábra: A CHNS mérésre alkalmas készülék	33
14. ábra: Búzaszalma fűtőérték növekedése	34
15. ábra: Repceszalma fűtőérték növekedése	35
16. ábra: Szőlővenyige fűtőérték növekedése	35
17. ábra: A három minta tömegváltozása az idő függvényében	41
18. ábra: A SYLAB IF2000G mérő berendezés [44]	45
19. ábra: A csókemence felépítése	46
20. ábra: Búzaszalma vizsgálata	47
21. ábra: Pörkölt búzaszalma vizsgálata	47
22. ábra: Repceszalma vizsgálata	48
23. ábra: Pörkölt repceszalma vizsgálata	48
24. ábra: Szőlővenyige vizsgálata	49
25. ábra: Pörkölt szőlővenyige vizsgálata	49
26. ábra: A hamu lágyulási pont jellemző hőmérsékletei a különféle alap- és kezelt anyagokra	50
27. ábra: A Zeiss EVO MA 10 típusú elektronmikroszkóp	51
28. ábra: A búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele	52
29. ábra: A búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvételéhez tartozó spektrum (Búzaszalma jelű felvétel)	52
30. ábra: A búzaszalma hamujának 500-szoros nagyítású felvétele	53
31. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvétel 1-es pontjának spektrum (Búzaszalma-3-1 jelű felvétel)	53
32. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvétel 2-es pontjának spektrum (Búzaszalma-3-2 jelű felvétel)	54
33. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvétel 3-as pontjának spektrum (Búzaszalma-3-3 jelű felvétel)	54
34. ábra: A búzaszalma hamujának 750-szeres nagyítású felvétele	55
35. ábra: A búzaszalma hamujának 750-szeres nagyítású felvételén látható 1-es pont spektruma (Búzaszalma-5-2 jelű felvétel)	55
36. ábra: A búzaszalma hamujának 750-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Búzaszalma-6 jelű felvétel)	56
37. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele	57
38. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvételéről vett átlag spektruma (Búzaszalma-B1 jelű felvétel)	57
39. ábra: A pörkölt búzaszalma 250-szeres nagyítású felvétele	58
40. ábra: A pörkölt búzaszalma 250-szeres nagyítású felvételének átlagtartalom spektruma (Búzaszalma-B1-3-1 jelű felvétel)	58
41. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 250-szeres nagyítású felvételén látható 1-es pont spektruma (Búzaszalma-B1-3-2 jelű felvétel)	59
42. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 250-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Búzaszalma-B1-3-3 jelű felvétel)	59

43. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 250-szeres nagyítású felvételén látható 3-as pont spektruma (Búzaszalma-B1-4 jelű felvétel)	60
44. ábra: A pörkölt búzaszalma 1000-szeres nagyítású felvétele	60
45. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 1000-szeres nagyítású felvételén látható 1-as pont spektruma (Búzaszalma-B1-6-1 jelű felvétel)	61
46. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 1000-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Búzaszalma-B1-6-2 jelű felvétel)	61
47. ábra: A repceszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele	63
48. ábra: Az 50-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma jelű felvétel)	63
49. ábra: A repceszalma hamujának 500-szoros nagyítású felvétele	64
50. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-2 jelű felvétel)	64
51. ábra: A repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvétele	65
52. ábra: A 2000-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-3 jelű felvétel)	65
53. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele	66
54. ábra: Az 50-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-R1 jelű felvétel)	66
55. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 500-szoros nagyítású felvétele	67
56. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-R1-3 jelű felvétel)	67
57. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvétele	68
58. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvételén látható 1-es pont spektruma (Repceszalma-R1-3-1 jelű felvétel)	68
59. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Repceszalma-R1-3-2 jelű felvétel)	69
60. ábra: A szőlővenyige hamujának 50-szeres nagyítású felvétele	70
61. ábra: A szőlővenyige hamujának 50-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige jelű felvétel)	70
62. ábra: A szőlővenyige hamujának 500-szoros nagyítású felvétele	71
63. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-2 jelű felvétel)	71
64. ábra: A szőlővenyige hamujának 1000-szeres nagyítású felvétele	72
65. ábra: Az 1000-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-3 jelű felvétel)	72
66. ábra: A pörkölt szőlővenyige hamujának 50-szeres nagyítású felvétele	73
67. ábra: Az 50-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-V1 jelű felvétel)	74
68. ábra: A pörkölt szőlővenyige hamujának 500-szoros nagyítású felvétele	74
69. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-V2 jelű felvétel)	75
70. ábra: A pörkölt szőlővenyige hamujának 1000-szeres nagyítású felvétele	75
71. ábra: Az 1000-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-V3 jelű felvétel)	76
72. ábra: A nátrium és kálium tartalom az egyes pörkölt tüzelőanyagokban	77
73. ábra: A defromációs hőmérséklet és a nátrium és kálium tartalom közötti összefüggés	77
74. ábra: A visszanedvesedési vizsgálat kiindulási állapotban	78
75. ábra: Robbanási jellemzők meghatározása [55]	80
76. ábra: Egy por robbanásának nyomás és idő görbéje [55]	80
77. ábra: A medián és a robbanási adatok összefüggései [55]	82
78. ábra: A nedvességtartalom hatása a robbanás jellemzőire [55]	82
79. ábra: A hőmérséklet hatása a p_{max} értékre [55]	83
80. ábra: Az energiatfüggetlen porok nyomásnövekedése a gyújtási energia függvényében [55]	84
81. ábra: Az energiatfüggő porok definíciója [55]	84
82. ábra: A berendezés vázlata [55]	86
83. ábra: A rendszer kapcsolási vázlata [55]	86
84. ábra: A vizsgálat folyamatábrája	87

85. ábra: Az eredeti minták szemcseanalízis eredménye	90
86. ábra: Szemcseanalízis eredménye	91
87. ábra: Szemcseanalízis eredménye	92
88. ábra: Szemcseanalízis eredménye	93
89. ábra: A búzaszalma és a pörkölt búzaszalma p_{max} , dp/dt diagramja a koncentráció függvényében.....	93
90. ábra: A repceszalma és a pörkölt repceszalma p_{max} , dp/dt diagramja a koncentráció függvényében.....	94
91. ábra: A szőlővenyige és a pörkölt venyige p_{max} , dp/dt diagramja a koncentráció függvényében	95
92. ábra: A felületnövekmény és a redukált nyomás összehasonlító táblázata	97

1. Bevezetés, célkitűzések

A biomassza energetikai célú felhasználásának története több ezer évre tekint vissza, míg az energetikai jellegű ipari felhasználása, csupán néhány évtizedes, esetlegesen évszázados történetű. Legnagyobb részben a fosszilis energiahordozókat hasznosítjuk hő- és villamos energia termelésre, melyek kitermelése manapság már rendkívül költségigényes folyamat. A jelenlegi olajár szinteken (2015. július, 50\$/hordó), sok olajkút termelését visszafogták, a palaolaj kitermelés megállt, tehát ma nem éri meg a legnagyobb költségekkel működő termelésű kutakat dolgoztatni.

Korábbi években is, de mostanság még nagyobb szerepe van, illetve lesz a környezetbarát technológiák műszaki fejlesztésének és kutatásoknak, melyek célja az energiahatékonyság növelése. Az energiahatékonyság növelésének elsődleges célja a primer energiahordozók felhasználás növekedésének mérséklése a termelés visszafogása nélkül.

A fejlesztések hatására egyre nagyobb lehetőség van az ipari méretben, a biomassza hatékony felhasználására, akár folyamatos üzemben, több tíz, akár száz MW-os nagyságrendben hő- és villamos energia előállítására is.

Így manapság az energiaellátás tekintetében egyre nagyobb szerepet játszik, és kell, hogy játsszék a biomassza, azon belül is, azok a tüzelőanyagok, melyek évről évre megújulnak. Mivel Magyarország jelentős agrártermelő ország, 5 340 000 hektár mezőgazdasági területtel rendelkezünk¹, ezért nagy figyelmet kellene fordítanunk a mezőgazdasági melléktermékek és hulladékok hasznosítására. Magyarországon 2013-ban 5 058 301 tonna búza termett², mely közelítőleg megegyezik a keletkező szalma mennyiségével. Mivel az állattenyésztés ennyi szalmát nem képes felvenni, nagy mennyiségben keletkezik „felesleges”, felhasználatlan szalma, ami energetikai szempontból fontos lehet a jövőben.

Ennek a szalmának jelenleg tápanyag pótlás a sorsa, az állattenyésztés számára nem hasznosuló mennyiséget a földeken hagyják aprított formában, majd nagy mennyiségű nitrogén alapú műtrágyával, illetve lebontó baktériummal beszántják. A tradicionális tarlóégetés gazdasági, környezetszennyezési és biztonsági okokból kerülendő (az Európai Unió ajánlása alapján csak fokozott figyelemmel, a földeket körbeszántva, illetve tűzoltósági felügyelettel szabad a tarlót felégetni). Egyik nagy hátránya a földbe szántásnak a degradációs idő: a könnyen elbomló részei (hemi-cellulóz) akár néhány nap alatt, a nehezebben elérhető összetevői lebontásához (pl.: lignin) hosszabb idő szükséges, nagyjából 5-

¹ http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_hosszu/h_omf001a.html, Központi Statisztikai Hivatal, Táblák (STADAT) - Hosszú Idősorok

² http://www.ksh.hu/docs/hun/agrar/html/tabl1_4_2_1.html, Fontosabb gabonafélék termésmennyisége, 1921–2013

6 hónap, optimális hőmérséklet és páratartalom mellett. Mivel télen a hőmérséklet jelentősen csökken, ezzel párhuzamosan a baktériumok aktivitása is, így az előző évi szalma teljes lebomlása a következő év tavaszára tehető, szinte az aratás előtti időpontra. A legtöbb tápanyagot viszont az elvetett mag igényli, már közvetlenül aratás után.

Amíg a tarlóégetés gyakorlat volt a keletkező hamut, mint magas kálium tartalmú „műtrágyát” használták, továbbá a termőföld fertőtlenítőszer volt, mert a hamu gátolja bizonyos baktériumok tevékenységét. Amennyiben erőművi, ellenőrzött körülmények között égetnénk el ezen anyagokat, vízzel hígítva a földekre lehetne juttatni a hamut és pernyét, akár aratás után azonnal. A Nitrogénművek Zrt., a Bige Holding Kft. és a Pannon Egyetem munkatársai egy közös kutatás keretében vizsgálták meg a biomassza hamu átalakítását egy egyszerű eljárással kálium-szulfáttá. Ez tulajdonképpen kálium tartalmú műtrágya, illetve talajjavító anyag, mely a gazdák számára értékesíthető termék [1].

A biomassza energetikai célú használata során keletkező összes anyagot értékes, esetlegesen értékesíthető termékként lehet hasznosítani. Egyes kutatók ajánlása alapján az elszenesített növényeket, növényi részeket egyes gazdák használják, mint tápanyagpótló és fertőtlenítő szereket. Ezek a szenesített növények hasonló tulajdonságúak, mint az aktív szén, mely ismert a nagy fajlagos felületéről. Hasonlóan jó megkötő képességűek ezek az elszenesített növényi részek, mivel nitrát megkötő hatásúak és növelik a talaj pH-ját [2].

Célkitűzések

Kutatásom fő célkitűzése megvizsgálni annak lehetőségét, hogy a mezőgazdasági melléktermékek milyen feltételek mellett alakíthatók nagyobb térfogat- és energiasűrűségű tüzelőanyagokká.

Vizsgálataimhoz három mezőgazdasági mellékterméket választottam ki, a búzaszalmát, a repceszalmát és a szőlővenyigét. A két szalma esetében a beszántás alternatív hasznosítási lehetőségeként a szőlővenyige esetében pedig a jelenlegi gyakorlat (ellenőrizetlen égetés) kiváltására alkalmas megoldásokat keresem. Dolgozatom célja a három alapanyag tüzeléstechnikai paramétereinek vizsgálatán alapuló hőkezelési technológia kidolgozása. Disszertációmban az alábbi szerkezetben mutatom be vizsgálataimat a kitűzött célokkal összhangban:

1. összefoglalom az energiasűrűség-növelés módszereinek eddig elérhető technológiáit.
2. Mezőgazdasági melléktermékek úgy, mint búzaszalma, repceszalma és szőlővenyigére vonatkozó:

- a) energiasűrűség növelő vákuumos eljárás, technológiai, technikai háttérnek kialakítása,
 - b) a hőkezelési technológia kidolgozása.
3. Az eljárással előállított termék:
- a) energetikai hasznosíthatóságának tüzeléstechnikai vizsgálata laboratóriumi mérésekkel és számításokkal,
 - b) összehasonlítása az alapanyagok tüzeléstechnikai paramétereivel.
4. Az eljárással előállított tüzelőanyagok tárolása, szállítása alatt:
- a) egy esetleges porrobbanás során fellépő robbanási tulajdonságok vizsgálata (K_{max} , p_{max}).
 - b) Az eljárással előállított tüzelőanyagok összehasonlítása az alapanyagok porrobbanási tulajdonságai alapján.

2. Tudományos előzmények

Egy adott tüzelőanyag energiasűrűsége alatt az egységnyi térfogatból felszabadítható energia mennyiségét értjük. A mezőgazdasági melléktermékek egyik nagy problémája, energetikai hasznosításának szempontjából az anyagok kis sűrűsége. A fűtőértékük közepesen nagy, kicsit alacsonyabb, mint bármilyen fa tüzelőanyag (pl.: bükkfa: 15,2 MJ/kg³). Ha a friss vágású fával hasonlítom össze, akkor nagyobb fűtőértéket kapok a mezőgazdasági melléktermék alacsony nedvességtartalma miatt. Kevésbé hasznosítják, mert nagy térfogatból viszonylagosan kis energia szabadítható fel. Emiatt ezeknek az anyagoknak a szállítása igen költséges lehet, tehát csak decentralizált energiatermelésre alkalmasak. Vannak olyan országok melyekben a különféle szalmák energetikai célokra való hasznosítása igen elterjedt, ilyen Dánia és Németország is [3].

Mivel a doktori disszertációm a biomassza, azon belül a mezőgazdasági hulladékok energiasűrűség növelésével foglalkozik, szeretném előzetesen bemutatni a már elérhető és működő technológiákat, elsődlegesen a mechanikus, majd a termikus eljárásokat.

2.1 Mechanikus eljárások

Mechanikus eljárás alatt olyan technológiát értünk, mely során pusztán a kiindulási anyag sűrűségét növeljük, ezek tipikus térfogat alakítási műveletek. Minden esetben az alapanyag hőmérséklete megemelkedik, a biomasszát alkotó lignin, hemi-cellulóz és cellulóz közül a lignin „megolvad” és természetes ragasztóként működik. Ezzel az aprított szemcsék összetapadnak szabályos geometria alakra, brikett esetén nagyobb, pellet esetén kisebb méretűekre.

2.1.1 Brikettálás

A brikettáló gép vagy egy dugattyús mechanizmussal vagy csigás mechanizmussal tömörít. A végtermék, általában hengeres, melynek mérete 80 mm átmérőjű 200 mm hosszú test. A geometriai alak ettől eltérő is lehet (1. ábra), de a befoglaló méretek nagyjából azonosak.

³ <http://www.enerles.si/en/calorific-value>



1. ábra: Különböző anyagú és alakú brikettek⁴

2.1.2 Pelletálás

A másik berendezés a pelletprés, mely lehet ún. síkmatricás vagy hengermatricás (2. ábra). A síkmatricás gépeket általában kis teljesítményre illetve kis kapacitásokra gyártják. A hengermatricás berendezéseket nagy kapacitású üzemekben alkalmazzák.



2. ábra: A síkmatricás (a) és a hengermatricás (b) pelletáló

A pellet, mindig hengeres alakú tömörítvény, melynek mérete 6 mm átmérőjű és 20-30 mm hosszú. A tüzelőanyag méretének csökkentése az adagolás miatt vált szükségessé. Ezzel a mérettel tudták megvalósítani az adagolás olyan módszerét, ami a pelletkazánok teljes automatizálhatóságát biztosította.

2.2 Termikus eljárások

Termikus eljárásnak nevezzük azokat az eljárásokat, melyek az alapanyagot hőhatásnak teszik ki, illetve egy adott hőmérsékletet elérve bizonyos ideig ezen a hőmérsékleten tartják az alapanyagot. Hőmérsékleti szempontból tehát három szakaszt különböztetünk meg: hevítés, hőntartás, lehűtés.

Biomassza kezelés, illetve a kívánt főtermék halmazállapotát tekintve alapvetően két kezelést különböztetünk meg:

⁴ <http://www.briquetting.co.uk/>

- gáz (amit sok esetben kondenzáltatunk 1. Táblázat) halmazállapotú főtermék,
- szilárd halmazállapotú főtermék.

A gáz halmazállapotú végtermék esetén is képződik szilárd, illetve folyékony termék, de a főtermék arányához képest sokkal kisebb mennyiségben (1. Táblázat). Ugyanígy a szilárd halmazállapotú főtermék esetén is képződnek folyadék, illetve gáz halmazállapotú termékek is.

Eljárás	Feltételek	Folyadék kihozatal	Szilárd kihozatal	Gáz kihozatal
Gyors pirolízis	~500 °C rövid tartózkodási idő ~ 1 s	75%	12% szén	13%
Közepesen gyors	~500 °C tartózkodási idő ~ 10-30 s	50%	25% szén	25%
Karbonizáció (lassú)	~400 °C, tartózkodási idő hosszú, óráktól egészen napokig	30%	35% szén	35%
Gázosítás	~750-900 °C	5%	10% szén	85%
Torrefaction	~290 °C, szilárd fázis tartózkodási ideje ~ 10–60 perc	0% ha nincs kondenzáció, egyébként 5%-ig	80%	20%

1. Táblázat: Az egyes kezelések főbb technológiai paramétereit és a főtermékek kihozatalainak aránya [4]

2.2.1 Pirolízis

A pirolízis egy nagyon régen használt eljárás, hóbontásnak is nevezik. Sokáig ipari méretben csak a kőolaj és földgáz iparban használták, az olaj és gáz alkotóira bontására. Lényege, hogy hő hatására oxigénmentes környezetben az anyagot alkotó molekulák között lévő kötések felbomlanak, és kisebb molekulák keletkeznek. A pirolízis a legegyszerűbb és valószínűleg a legősibb módja a biomassza jobb minőségű tüzelőanyaggá való átalakításának.

A pirolízis oxigénmentes környezetben, általában 300-800 °C közötti hőmérsékleten zajlik egészen addig, amíg a biomasszában lévő összes alkotó át nem alakul vagy fel nem szabadul.

A pirolízis endotermikus folyamat, amely sokféle kémiai reakcióból tevődik össze, és egyúttal nagyszámú terméket produkál. A hóbontás során mindig keletkezik:

- pirolízis koks,
- kátrány, bioolaj,
- pirogáz, ami nagyrészt metánt, hidrogént, szénmonoxidot, széndioxidot és vízgőzt tartalmaz [5].

Az egyes komponensek aránya függ a biomasza összetételétől, eredetétől, nedvességtartalmától, a feldolgozott biomasza szem nagyságától, a felhasznált iners gáztól, a pirolízis reaktor forró zónájának hőmérsékletétől, a gázok, illetve a szilárd fázis tartózkodási idejétől, katalizátor alkalmazásától, stb. Technológiai szempontból a pirolízis folyamat az alkalmazott hőmérséklet szerint lehet:

- kis hőmérsékletű (500 °C alatt),
- közepes hőmérsékletű (500 – 800 °C),
- nagy hőmérsékletű (800 °C felett).

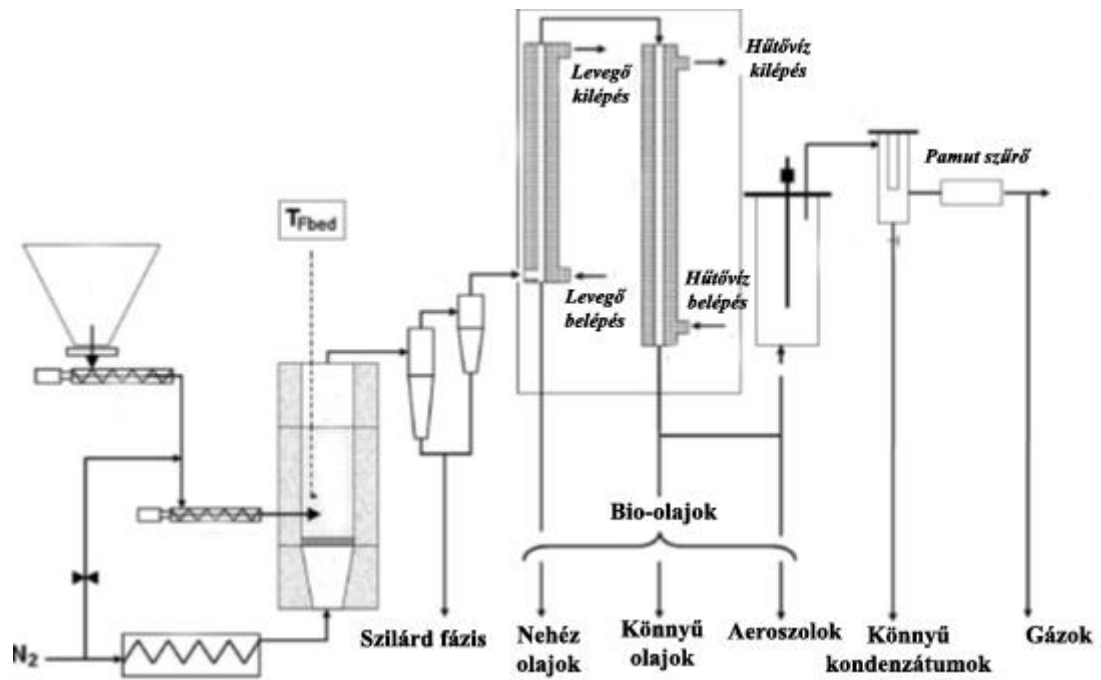
A kis hőmérséklet (400-500 °C) és hosszabb tartózkodási idő a reaktorban, nagyobb arányú kokszképződéshez vezet (karbonizáció) [6]. A nagy hőmérséklet (800 – 1000 °C) és hosszú tartózkodási idő a reaktorban, nagy arányú pirolízis gázképződést okoz (elgázosítás) [7]. A mérsékelt hőfok (500-600 °C) és rövid tartózkodási idő (gyors pirolízis) nagy arányú folyékony terméket eredményez, illetve káros mellékterméket (kátrány) [8]. A folyamat alatt az elért hőfok függvényében változatos termokémiai folyamatokat figyelhetünk meg, amelyeket az egyszerűség kedvéért három hőmérsékleti intervallumba oszthatunk:

- 200 °C-ig terjedő hőmérsékleti tartományban nedvesség eltávozás zajlik. Ezek a folyamatok erősen endotermikusak.
- 200 °C és 500°C között következik az ún. száraz desztilláció. Főleg itt megy végbe a nagy molekulájú szerves anyagok oldalláncainak leszakadása és a makromolekuláris struktúrák gáznemű és folyékony szerves termékekre és szilárd karbonra való átalakulása.
- A gázképződés fázisában 500 °C és 1200 °C között a száraz desztilláció termékei tovább bomlanak és transzformálódnak. Ennek során úgy a szilárd szénből, mint a folyékony szerves anyagokból stabil gázok képződnek, úgymint H₂, CO, CO₂, CH₄.

A metán képződésének a lassú felfűtési sebesség és alacsony hőmérséklet kedvez, amennyiben gyors hevítési sebességet választunk, előfordulhat olyan eset, amikor a metán csak nagyon kis részarányban képződik, mert a metán gyorsan átalakul szén-monoxiddá és szén-dioxiddá vízgáz reakcióban.

A pirolízis berendezéseket a kívánt végtermék fajtája szerint csoportosítjuk, ami tulajdonképpen a pirolízis típusa szerinti osztályozást jelenti [5]. A lassú pirolízis berendezései: karbonizáló kemencék, és retorták. Ezek alkalmasak faszén gyártáshoz (karbonizáció) is. 500 °C körüli gyors pirolízis (3. ábra) célja a folyékony bioüzemanyag gyártás. A pirolízis olaj gyártására alkalmas berendezések: fluidágyas pirolízis berendezések. A pirolízis lejátszódhat vízgőz (párás elgázosítás), hidrogén (hidrogenizálás), vagy kis mennyiségű levegő (elgázosítás) jelenlétében. [6]

A pirolízis termékeknek, főleg az előállítható bioolajnak nagy jelentőségük van energetikai szempontból. Egyik nagyon fontos főtermék a metán tartalmú pirogáz, amely villamos áram előállítására alkalmas, pl. gázturbina segítségével. A folyékony halmazállapotú pirolízis végtermék a kőolajhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, viszont tartalmaz bizonyos savakat, ezért felhasználásuk előtt megfelelő kezelési eljárásnak kell alávetni. [9]



3. ábra: Egy példa a gyors pirolízis kapcsolására [9]

2.2.2 Torrefaction

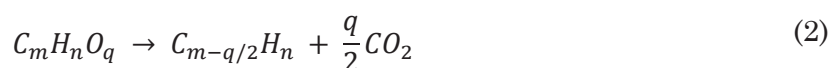
A torrefaction (a továbbiakban: pörkölés) egy háromlépcsős termokémiai hőkezelés, mely alacsony hőmérséklet tartományban, jellemzően 200-300°C között megy végbe, légkörihez közeli nyomáson oxigén jelenléte nélkül. A technológia egy hevítési, egy hőntartási és egy lehűlési fázisból áll. A kezelés végeredménye egy nagyobb fűtőértékű szilárd tüzelőanyag, mely az eredetihez képest kisebb tömeggel rendelkezik. Fontos technológiai paraméter az alacsony hevítési sebesség, 10-100°C/min közé ajánlják a hevítési sebességet [10][11].

Az első pörkölő üzemet 1987-ben építette meg Pechiney [12], az üzemelési tartomány 240-280°C között míg a tartózkodási idő 60-90 perc között volt. A hőátadó felület, és a beadagolt alapanyag nedvességtartalma (max. 15%) volt a korlátja a technológiának. A maximális kapacitása 2 tonna volt óránként. A számított hatásfok 65-75% között volt (ez a hatásfok egy konverziós hatásfok, mely az alapanyag és a keletkezett végtermék energia-tartalmát állítja arányba). Ezt a technológiát fa kezelésére alkalmazták. Jellemzően a már megépült pörkölő pilot üzemek is szinte csak fa kezelésére épültek.

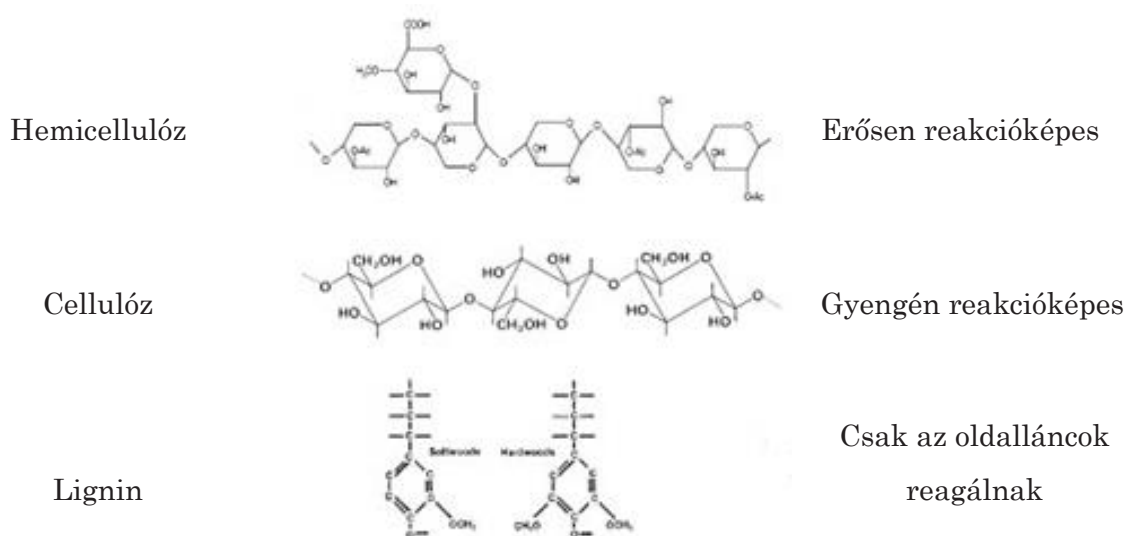
A növények sejtfalet felépítő poliszaharidok a lignin, a cellulóz és a hemi-cellulóz. Az összes növény különböző arányban tartalmazza a felsorolt polimereket.

A nagyobb energiasűrűséget elsősorban a reaktív hemicellulóz bomlásával érjük el [13].

A reaktor belsejében a hevítési fázisban először a minta nedvessége párolog el, majd a kötött víz is eltávozik. A hemicellulóz bomlása már 225°C-on megindul és 325°C-ig tart, a cellulóz 305 °C és 375 °C között, míg a lignin degradálódása 250°C és 500°C között megy végbe. Mivel csak maximum 300°C-ig hevítjük a rendszert, szinte csak a hemicellulóz depolimerizálódik, azaz a hemicellulóz polimer monomerré visszaalakul, lebomlik [11], illetve alapvetően a következő két folyamat miatt változik meg az oxigén tartalom a biomasszában[13]:

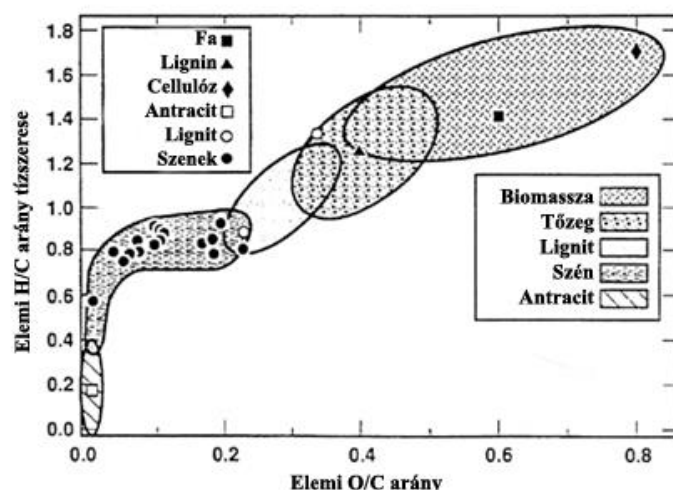


Tehát az oxigén először a víztelenedés (1) másodsor pedig a dekarbonizáció (2) miatt távozik el a biomasszából. A reakció, melyet a (2)-es egyenlet ír le, magában foglalja azt, hogy a biomassza H/C aránya nő, illetve, hogy a szárazanyagra (maradék szilárdra) vonatkoztatva kevesebb CO₂ kibocsátása lesz a pörkölt biomasszát hasznosító létesítménynek.



4. ábra: A növényi sejtfalet felépítő polimerek és reakcióképességük a pörkölés során [10]

Mivel a hemicellulóz és a lignin is (4. ábra) tartalmaz OH csoportot, és mivel a hemicellulóz a legreakcióképesebb, így a tüzelőanyag elemi H/C aránya is megváltozik, amit a méréseim is igazoltak.



5. ábra: A szilárd tüzelőanyagok elemi hidrogén és oxigén, karbon aránya [14]

Az 5. ábrán látható, hogy a minél kevesebb a hidrogén és az oxigén a karbonhoz képest annál nagyobb a tüzelőanyag fűtőértéke (antracit: $H/C = 0,02$, míg az $O/C = 0,01$, fűtőértéke = $30,08 \text{ MJ/kg}^5$).

A pörkölés során dehidratációs folyamat is megindul, mint minden polimer esetén, aminek következtében a lignin oldalláncain található, OH^- csoportok lebomlanak. Ez a bomlás a pörkölt tüzelőanyag víztaszító tulajdonságáért felel. Ennek tudható be, hogy a pörkölt biomassza tárolása olcsóbb lehet a nyers biomasszáénál, mivel nem, vagy csak alig vesz fel vizet a szabad ég alatti tárolás során [15].

A legtöbb kutató, illetve a legtöbb kutatás a fa pörkölésével foglalkozik. A fa használatának magyarázata annak kémiai tisztaságában rejlik.

Elemek	11 fajta keményfa átlaga	Búzaszalma
Szén	50,1%	47,6%
Hidrogén	6,2%	5,8%
Oxigén	43,5%	44,4%
Nitrogén	0,1%	0,68%
Kén	<0,05 %	0,08 %
Kálium	-	1%
Klór	<0,01	0,24%

2. táblázat: A fa és a búzaszalma elemi összetétele [16]

Patrick C. A. Bergman [10] írta az első és legalaposabb kutatást a témában, munkáját a hollandiai Energy Center of Netherlands (ECN) kutatóhelyen. A munkájában leírja, hogy miért a fát, mint alapanyagot használ. Ő javasolja először, hogy a pörkölt terméket pelletálni kell a legjobb hasznosíthatóság végett. A kutatásai során nitrogént használ

⁵ http://www.engineeringtoolbox.com/coal-heating-values-d_1675.html

hőközlő, illetve inertizáló médiumként. A kezelés során 92%-os konverziós hatásfokot értek el (hőenergia output/hőenergia input). Mark Jan Prins [11] kutatását Eindhovenben végezte, legnagyobb figyelmet a fűzfára fordította (kiindulási fűtőérték 17,6 MJ/kg), de Ő már vizsgált búzaszalmát is, bár ehhez kapcsolódó kísérleti eredmény nem elérhető. A hőközlő gáz az Ő kísérletei esetén is nitrogén volt. Ayla Uslu [13] munkájában szinte ugyan azt az eljárást alkalmazta, mint Bergman. A kutatások során fát kezeltek, melynek kiindulási fűtőértéke 17,7 MJ/kg volt. Uslu munkájának vezetője Bergman volt. A [17] irodalomban az ún. PATRIG berendezést mutatják be. A kutatók ebben az esetben többféle fa kezelését mutatják be, különböző hőmérsékleteken. Michiel van der Stelt többek között kipróbált cukornádat, többféle fát, de még RDF-et (települési szilárd hulladékból nyert másod-tüzelőanyag) és búzaszalmát is vizsgált, ennek eredményeit a [18]-as irodalomban találjuk. Az előbb bemutatott kutatók minden esetben az valamilyen iners gáz (pl.: argon, nitrogén) használatával érik el. Néhány kutató említést tesz búzaszalma [15][19] pörköléséről, de ők is iners gázt használnak a reaktor inertizálására [20][21], ezen kutatások eredményeit a 3. táblázatban láthatjuk.

	Vizsgált biomassza	Kiindulási fűtőérték [MJ/kg]	Elért fűtőérték [MJ/kg]	Pörkölési hőmérséklet [°C]	Hőntartási idő [min]	Kezelés energiaigénye [kJ/kg]
P. C. A. Bergman	fűzfa	17,7	20,8	280	17,5	n.a.
	bükkfa	17,0	20,8	250	30	n.a.
	vörösfenyő	18,2	21,6	250	30	n.a.
	búzaszalma	16,1	18,9	250	30	n.a.
Mark Jan Prins	fűzfa	17,6	19,4	250	30	449±87
	fűzfa	17,6	21	300	10	400±124
Ayla Uslu	fa	17,7	20,4	250	30	n.a.
PATRIG	fa	19,9	20,9	235	n.a.	n.a.
	fa		21	245	n.a.	n.a.
	fa		21,6	255	n.a.	n.a.
	erdészeti hulladék	20,2	20,9	255	n.a.	n.a.
	erdészeti hulladék	20,9	21,4	255	n.a.	n.a.
	aprított fakéreg	20,5	21,3	255	n.a.	n.a.
	fenyő apríték	20,3	21,2	255	n.a.	n.a.
	fűzfa	19,8	21,4	255	n.a.	n.a.
Michiel van der Stelt	cukornád	18,24	18,8	240	n.a.	n.a.
	cukornád	18,24	19	270	n.a.	n.a.
	búzaszalma	17,3	20,8	260	n.a.	n.a.
Kuzmin S.	búzaszalma	16,67	17,64	220	40	n.a.
	búzaszalma	16,67	19,03	240	50	n.a.

3. táblázat: Az egyes kutatók által elért eredmények összefoglaló táblázata

Az erdeinkben nem használunk műtrágyát, mert ezek a növények alig igénylik a folyamatos tápanyagpótlást. A mezőgazdasági termelés során viszont évente több alkalommal műtrágyázunk, melyekkel káliumot, klórt és egyéb ásványi anyagokat juttatunk a növényeknek. Ezek az ásványi anyagok a mezőgazdasági melléktermékben felhalmozódnak, pontosabban nem tudnak kiürülni.

Ezek az anyagok a szalmák pörkölésénél, illetve az energetikai hasznosítás (égetés) során korróziós problémákat okozhatnak [22]. A kálium csökkentheti a hamu olvadási hőmérsékletét [23], és a hamu alacsonyabb tűztéri hőmérsékletnél olvad rá a szerkezeti elemekre, mely akár keresztmetszet csökkenést is okozhat, illetve hőszigetelő réteget alkot a hőátadó felületeken. A pedig a berendezés szerkezeti acéljait károsítja[24].

3. Differenciál termogravimetriai vizsgálatok

3.1. A vizsgálati eljárás

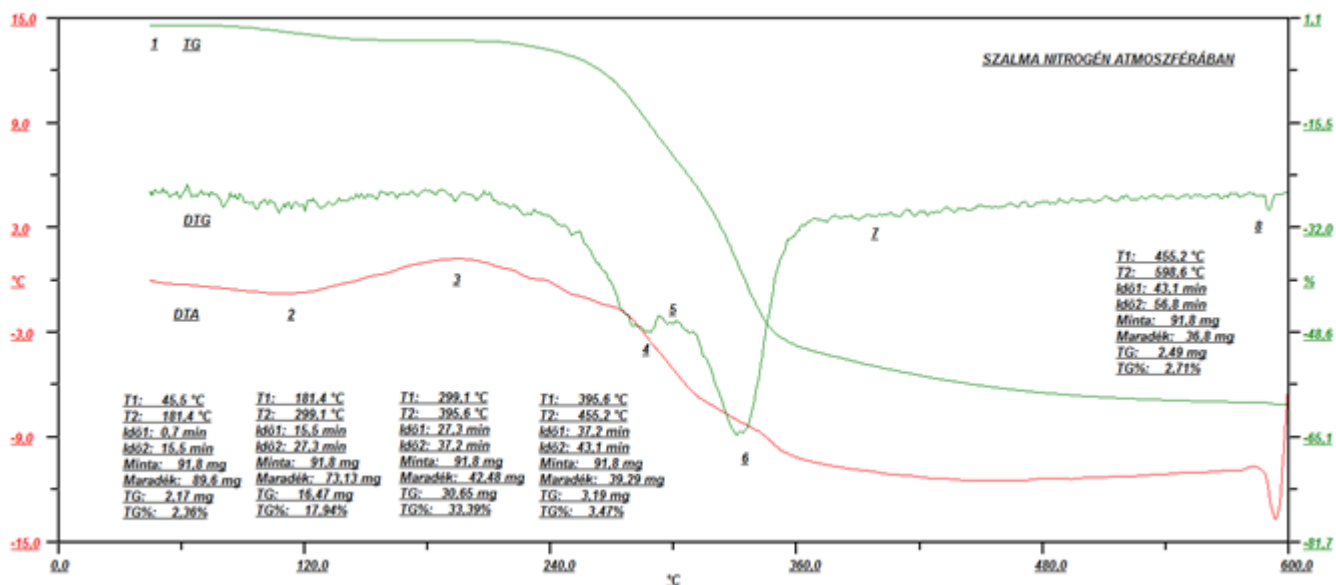
A következőkben bemutatom a választott alapanyagokra vonatkozó optimális hőmérsékletet, melyet differenciál termogravimetriás (derivatográfus) vizsgálattal határoztam meg. A derivatográf segítségével meg tudom állapítani, hogy milyen folyamatok mennek végbe hőmérséklet emelés hatására.

A termogravimetriai elemzések a vizsgált biomassza optimális hőkezelési hőmérsékletének meghatározására szolgálnak. A derivatográfia a termikus elemzések közé tartozik. A termikus elemzések a vegyületekben, illetve többkomponensű rendszerek esetében a vegyületek között hő hatására végbemenő kémiai reakciók vagy fizikai átalakulások vizsgálatára szolgálnak [25].

A derivatográfus vizsgálatot elvégeztük nitrogén atmoszférában, melynek eredménye három függvény. A három vizsgálati eredmény, a TG (Termogravimetria), DTG (Differenciál Termogravimetria) és a DTA (Differenciál-Termikus Analízis). A TG görbe a tömegváltozást mutatja a hőmérsékletváltozás hatására. A DTG a TG görbe deriváltja tulajdonképpen, ez az ún. differenciál termogravimetrikus görbe. A DTA görbe pedig azt a hőmennyiséget mutatja meg, amely a minta felmelegítése illetve hevítése esetén a hőtartalom változással járó fizikai és kémiai változások miatt felszabadul, illetve elnyelődik a vizsgálati rendszerben. A kapott görbék a minimuma felé, endoterm míg a maximuma felé haladva, exoterm folyamatokra utal.

A vizsgálatok eredményeiből megállapítható a pörkölés optimális hőmérséklete a kiválasztott alapanyagokra. A mérések egyik eredménye a TG görbe, ebből megállapítható, hogy 300 °C-ig melyik hőmérsékleten adódik a legnagyobb tömegcsökkenés. A hőkezelések alatt ezt a hőmérsékletet nem szabad elérni, a technológiai hőmérsékletet úgy kell beállítani, hogy mindig ez alatt legyen. A pörköléseimet három (búzaszalma, repceszalma, szőlővenyige) kiválasztott biomasszára végeztem el. Az következőkben nitrogén atmoszférában végzett derivatográfus vizsgálatok eredményeit szeretném bemutatni.

3.2. Vizsgálati eredmények



6. ábra: A búzaszalma TG, DTG és DTA görbéje

A derivatogram görbét kiértékelve nyert adatokat a 2. táblázatban foglaltam össze:

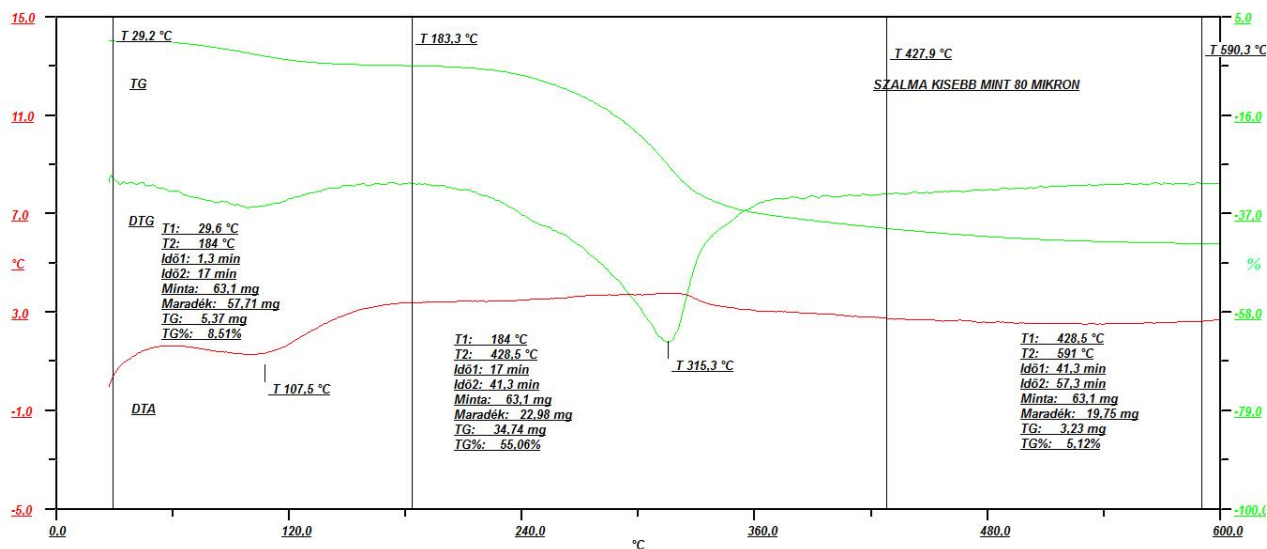
	Hőmérséklet T, [°C]	Tömegváltozás TG, [%]	Hőmérsékletkülönbség DTA, [°C]	Tömegváltozás sebessége DTG
1	45	-0,03	-0,037	-0,014
2	112	-1,13	-0,762	-0,276
3	195	-2,45	+1,223	-0,009
4	286	-14,91	-3,184	-3,971
5	294	-18,34	-4,323	-3,572
6	331	-37,49	-8,039	-6,912
7	395	-53,73	-10,940	-0,640
8	600	-59,64	-10,788	-0,073

4. Táblázat: A minta derivatogramjának jellemző pontjaihoz tartozó értékek

A 6. ábráról megállapítható legfontosabb jellemzők:

1. a maximális nedvesség eltávozási sebesség hőmérséklete: 112 °C,
2. a száradás befejeződésének hőmérséklete: 195 °C,
3. az illók kiválásának kezdőhőmérséklete: 195 °C,
4. az illók leggyorsabb kiválásának hőmérséklete: 331 °C,
5. az illók kiválásának véghőmérséklete: 420 °C,
6. a hőkezelés véghőmérséklete: 600 °C.

A búzaszalmánál 294°C-ig a minta 18,34%-a lebomlik, így ezen hőmérsékletet alá beállítani a kemence atmoszféra hőmérsékletét, hogy minél nagyobb arányú szilárd anyag maradjon vissza a rendszerben.



7. ábra: A repceszalma TG, DTG és DTA görbéje

A derivatogram görbéit kiértékelve nyert adatokat a 3. táblázatban foglaltam össze:

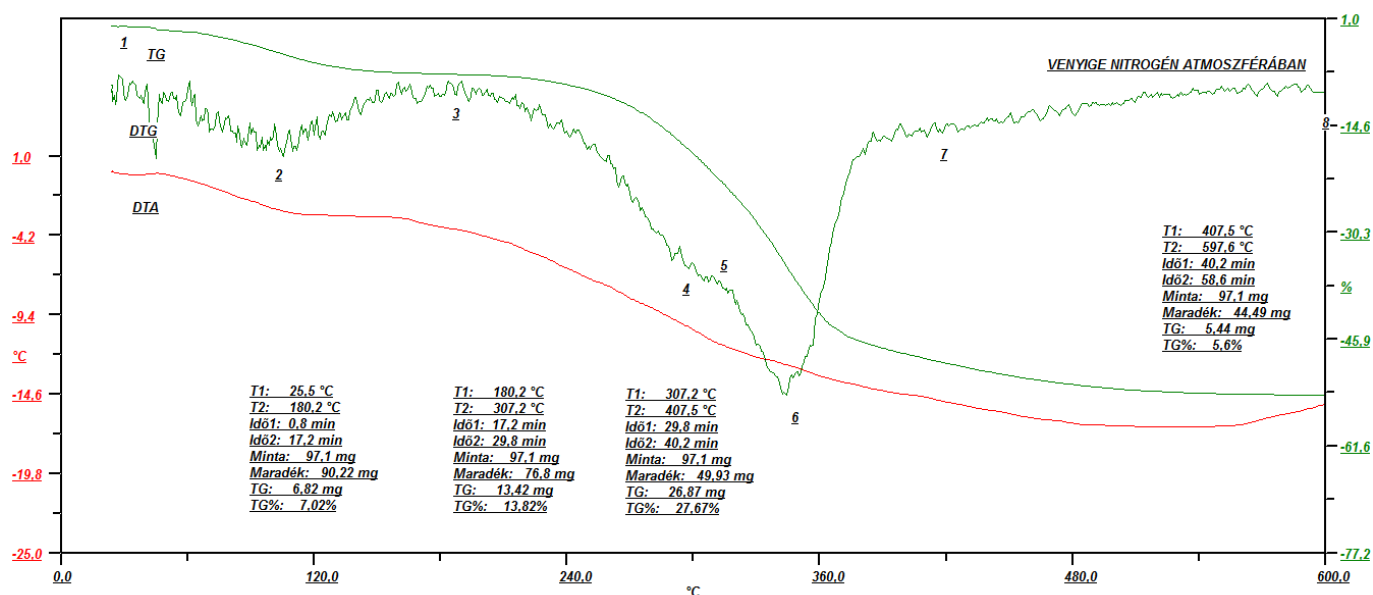
	Hőmérséklet T, [°C]	Tömegváltozás TG, [%]	Hőmérséklet különbség DTA, [°C]	Tömegváltozás sebessége DTG
1	29,2	-0,02	0,505	0,049
2	100,7	-4,5	1,3	-0,787
3	183,3	-8,52	3,387	-0,092
4	284,3	-16,1	3,482	-0,345
5	315,3	-41,48	3,775	-4,887
6	427,4	-63,59	2,739	-0,317
7	590,3	-68,71	2,64	-0,046

5. Táblázat: A minta derivatogramjának jellemző pontjaihoz tartozó értékek

A 7. ábráról megállapítható legfontosabb jellemzők:

1. a maximális nedvesség eltávozási sebesség hőmérséklete: 100,7 °C,
2. a száradás befejeződésének hőmérséklete: 183,3 °C,
3. az illók kiválásának kezdőhőmérséklete: 183,3 °C,
4. a legnagyobb tömegcsökkenés 300 °C alatt: 300 °C,
5. az illók leggyorsabb kiválásának hőmérséklete: 315,3 °C,
6. az illók kiválásának véghőmérséklete: 427,4 °C,
7. a hőkezelés véghőmérséklete: 600 °C.

A repceszalmát is célszerű 280°C-on hőkezelné, mivel a minta 16,1%-a már 284°C-on lebomlott.



8. ábra: A szőlővenyige TG, DTG és DTA görbéje

A derivatogram görbéit kiértékelve nyert adatokat a 4. táblázatban foglaltuk össze:

	Hőmérséklet T, °C	Tömegváltozás TG, %	Hőmérséklet különbség DTA, °C	Tömegváltozás sebessége DTG
1	25	-0,06	-0,075	-0,144
2	110	-4,30	-2,770	-0,909
3	180	-7,100	-3,675	-0,126
4	296	-17,92	-10,144	-2,711
5	311	-22,47	-11,307	-2,925
6	344	-35,34	-12,691	-4,634
7	410	-48,74	-14,782	-0,669
8	600	-54,18	-15,342	-0,007

6. Táblázat: A minta derivatogramjának jellemző pontjaihoz tartozó értékek

A 8. ábráról megállapítható legfontosabb jellemzők:

1. a maximális nedvesség eltávozási sebesség hőmérséklete: 110 °C,
2. a száradás befejeződésének hőmérséklete: 180 °C,
3. az illók kiválásának kezdőhőmérséklete: 180 °C,
4. az illók leggyorsabb kiválásának hőmérséklete: 311 °C,
5. az illók kiválásának véghőmérséklete: 410 °C,
6. a hőkezelés véghőmérséklete: 600 °C.

A szőlővenyigét pedig 296 °C alatt érdemes pörkölni a derivatográfus vizsgálat alapján, mivel csak 296°C-on tapasztalható a minta 17,92%-os lebomlása. 280°C-on fogom a hőkezelést elvégezni szőlővenyige esetén is.

3.3 Eredmények értékelése

A vizsgálati eredmények a 7. Táblázatban találhatók összefoglalva, melyben látszik a pörkölés maximálisan megengedett hőmérséklete. Ennek megállapítására a következő gondolatsort alkalmaztam. A TG görbén látszik a felmelegítés során kialakult vízszintes, mely a minta abszolút száraz állapotát mutatja. Ebből a jobb oldali tengelyen leolvasható a minta nedvességtartalma, amennyiben ehhez az elvesztett tömeghez maximálisan még 10% illó kiválást engedünk, akkor az ehhez tartozó hőmérsékletet leolvassva megkapjuk a vízszintes tengelyen a maximális pörkölési hőmérsékletet.

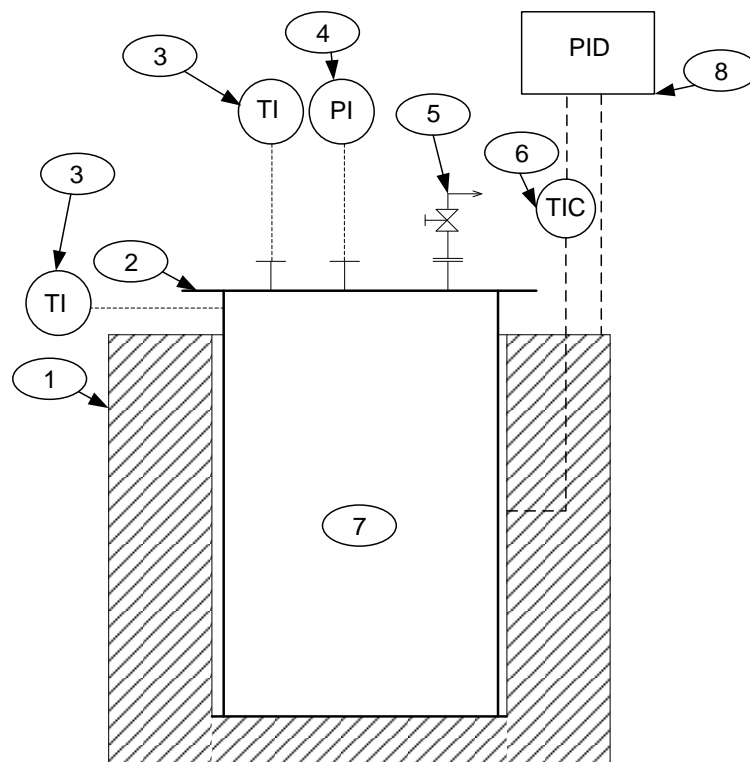
<i>Jellemzők</i>	<i>Hőmérséklet [°C]</i>		
	<i>Búzaszalma</i>	<i>Repceszalma</i>	<i>Szőlővenyige</i>
A maximális nedvesség eltávozás sebességének hőmérséklete	112	100,7	110
A száradás befejeződésének hőmérséklete	195	183,3	180
Az illók kiválásának kezdőhőmérséklete	195	183,3	180
A pörkölés maximális hőmérséklete	295	290	298
Az illók leggyorsabb kiválásának hőmérséklete	331	315,3	311
Az illók kiválásának vég-hőmérséklete	420	427,4	410
A hőkezelés vég-hőmérséklete	600	600	600

7. Táblázat: A derivatográfus vizsgálatok összefoglaló táblázata

4. Biomassza pörkölése vákuumban

4.1 Készülék leírása

A hőkezeléseket egy a HÓKER Kft. által gyártott HK-AL 10/10-es típusú kemencében végeztem el, melyet a Metallurgiai és Öntészeti Intézet bocsátott rendelkezésemre. A berendezés belsejébe egy „kapszulát” kellett telepíteni. A kapszula vákuumra lett méretezve, mert az első lépés vákuumszivattyús inertizálás volt. Szinte minden szerző légköri, vagy légkörihez közeli nyomásértéket állít be a hőkezelések során, soha nem engedik meg nagyobb nyomás kialakulását [10][11][20][21][26]. A vákuumozás után a képződő gázok nyomásnövekedést okoznak, mely növekedést légköri nyomáson korlátozom, folyamatos gáz- elvétellel. A mérést a 9. ábrán látható berendezésben valósítottam meg.



9. ábra: A mérés kapcsolási vázlata

A berendezés első verzióját (10. ábra) többszöri módosítás után a 11. ábrán láthatóra fejlesztettem, mely a mérések során kisebb problémákat leszámítva jól működött.

A berendezés vákuumkamrájába, a 9. ábrán látható acél (P265GH) tégelybe (7) helyeztem ismert tömegű, előaprított mezőgazdasági mellékterméket. A hőmérséklet (belső tér és a kapszula fal) mérésére egy-egy K típusú hőelemet használtam (3). A belső hőmérséklet méréséhez a 9. ábrán látható csonkon keresztül vezettem a kemencetérbe. A vákuumozást és a pirogáz elvételt a gáz- elvételi csonkon (5) keresztül oldottam meg.

A berendezés része még egy nyomásmérő óra (4), valamint egy hőmérséklet-szabályzó (6) és vezérlő egység (8), mely a fűtőfelületen (1) bevitt hőmennyiséget szabályozza a hőmérséklet-szabályzó által adott jel alapján. A tégelyt elektromosan elszigeteltem a kemence hőmérséklet-szabályzójától.



10. ábra: A pörkölő kemence módosított változata

A kísérletek során gondoskodni kell arról, hogy a kis sűrűségű szalmát a vákuum ne szívja el. Ennek megakadályozására alkalmaztunk egy belső fedelet.

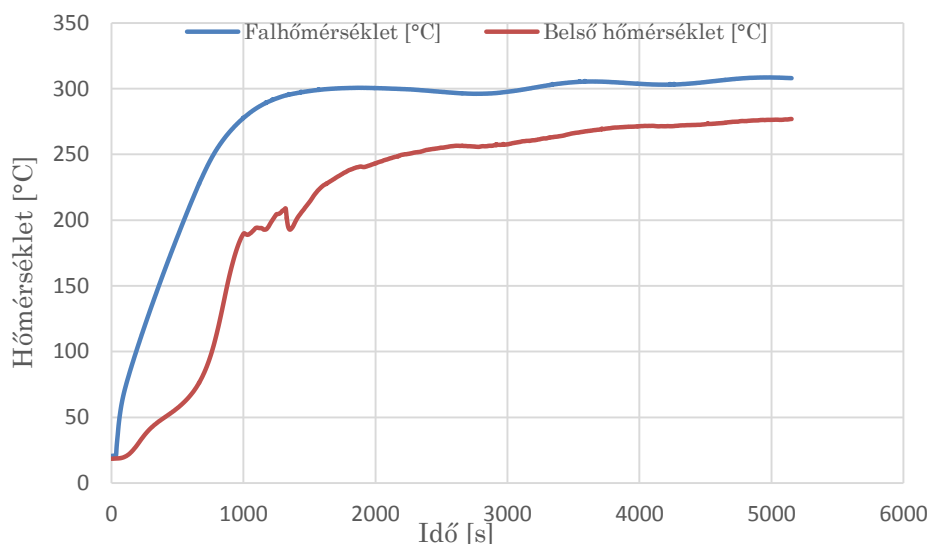
4.2 A Vizsgálati eljárás

A rendszer légtelenítése után (0,1 bar_a), felfűtöttük a kemencét, 12 °C/perc fűtési sebességgel, 24 perc alatt 280 °C-ra. A hevítési szakaszt különböző időtartamú hűtési idő követte, melyet a lehűtési szakasz zár.

A vákuumszivattyú 30 másodperc vákuumozási időhöz tartozó szükséges szívóteljesítményét az alábbi összefüggéssel határoztam meg [27]:

$$V_{\text{lesz}} = \frac{V}{\tau} \cdot \left(-\ln \frac{p_{\text{ü}}}{p_{\text{k}}} \right) \cdot \varepsilon \cdot \frac{1}{\eta_{\text{vol}}} \quad (3a)$$

$$V_{\text{lesz}} = \frac{0,004 \text{ m}^3}{0,5 \cdot \frac{1}{60}} \cdot \left(-\ln \frac{0,1 \text{ bar}}{1 \text{ bar}} \right) \cdot 1,1 \cdot \frac{1}{0,8} = 1,52 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (3b)$$



11. ábra: Egy példa a hőmérséklet változására mérés közben (búzaszalma hőkezelése 30 percig)

A hőkezelések során a kemencetéri hőmérsékletet (állandó hőmérséklet), az acél kapszula fal és a belső tér hőmérsékletét mértem.

A hőkezeléseket 20, 50, 150, 225, 300, 900 és 1800 másodperces hőtartási időkre végeztem el. A hőkezelés kezdeti (minden esetben 50 g) és a hőkezelés utáni tömeget regisztráltam (8. táblázat). A végtermékek égéshőjét a Miskolci Egyetem Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszékének laborjában határoztam meg.

Hőtartási idő [s]	Visszamaradt tömeg (búzaszalma) [g]	Visszamaradt tömeg (repceszalma) [g]	Visszamaradt tömeg (szőlővenyige) [g]
20	41,2	41,8	41,0
50	39,1	39,8	39,3
150	34,2	34,7	35,1
225	29,7	32,4	31,9
300	27,4	30,1	29,6
900	23,1	26,2	24,8
1800	20,9	21,6	21,0

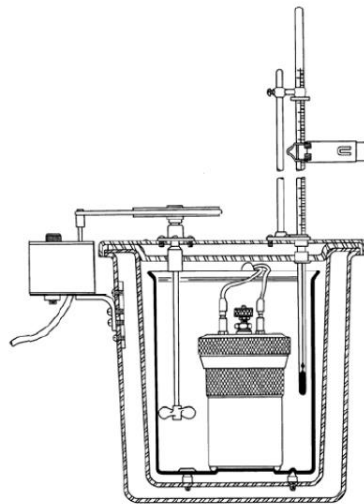
8. táblázat: A mérések során mért visszamaradt tömegek

5. Az alapanyagok és a pörkölés eredményezte termékek tüzeléstanai paramétereinek elemzése

5.1 Kísérleti vizsgálatok módszere

A végtermék égéshőjének meghatározását a Miskolci Egyetem Tüzeléstanai és Hőenergia Intézeti Tanszékén végeztem el egy Parr 6200 típusú kaloriméterben. A fűtőérték meghatározásához ismernünk kell az adott anyag nedvességtartalmát, illetve a hidrogéntartalmát. Ezek felhasználásával számíthatjuk a fűtőértéket.

Az égéshő meghatározásának folyamata a következő, egy ún. kaloriméter bombába helyezük az ismert tömegű, 500 µm alatti szemnagyságú mintákat, és tiszta oxigénben elégetjük. Az égés hatására a bombát körülvevő folyadék, melynek ismerjük a hőkapacitását (közönséges hálózati víz) felmelegszik, és a számítógép a felmelegedéséhez szükséges energiából számítja az anyag ún. égéshőjét.



12. ábra: A kaloriméter metszeti képe

Az égéshőből a nedvesség és a hidrogéntartalom ismeretében lehet kiszámítani a tüzelőanyag fűtőértékét a következő összefüggéssel [28]:

$$H_u = H_a - 24,42 \cdot (8,94 \cdot H + W) \quad (4)$$

5.2 Kísérleti vizsgálatok eredménye

A minták nedvességét szárítószekrényben vizsgálatuk meg tömegállandóságig szárítva 105°C-on [29], melynek eredménye a 9. táblázatban látható.

Minta	Mérés 1 [m/m%]	Mérés 2 [m/m%]	Mérés 3 [m/m%]
Búzaszalma	7,46	7,43	7,46
Repceszalma	7,05	7,00	6,93
Szőlővenyige	8,33	7,53	7,42

9. Táblázat: Az alapanyagok összes nedvességtartalma

Az elemi analízis (karbon-, hidrogén-, nitrogén- és kéntartalom) elvégzése után az égéshőből számítható az adott tüzelőanyag fűtőértéke. Az elemi analízisnél elégetés során képződő gázokban megtalálható elemeket vizsgáljuk. A mérést a 13. ábrán látható berendezéssel végeztem el. A CHNS mérés tulajdonképpen egy gázelemzés, gázkromatográfiás elven mér, mert a berendezésben elégetésre kerül a minta, és a fejlődött gázból határozza meg az egyes elemek arányát.



13. ábra: A CHNS mérésre alkalmas készülék

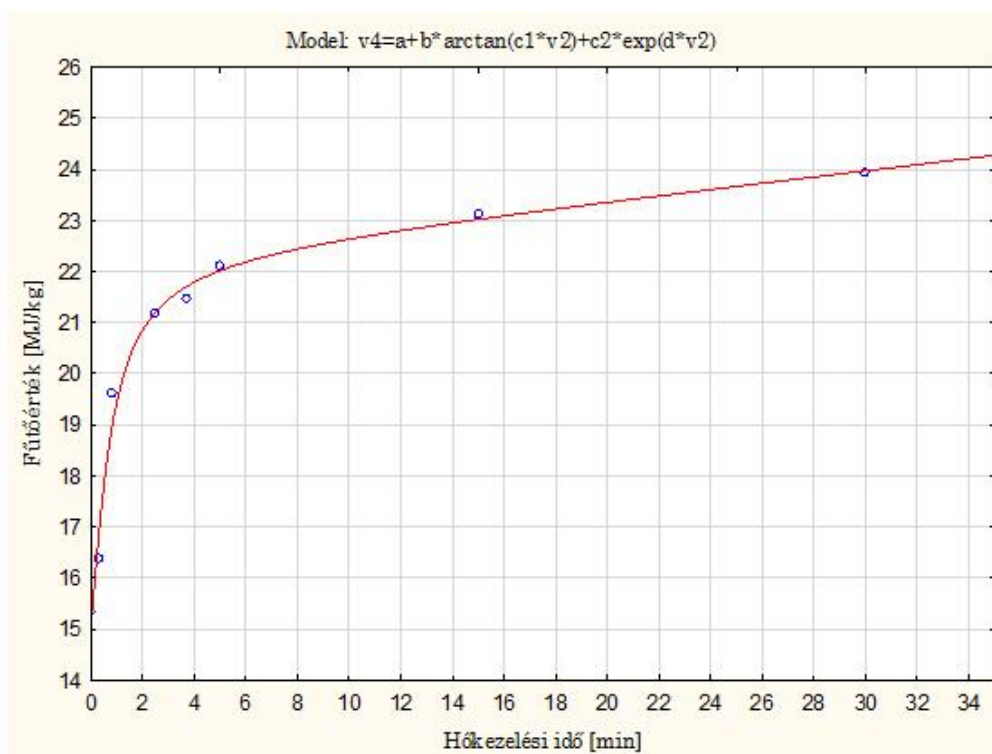
	C [m/m %]	H [m/m %]	N [m/m %]	S [m/m %]	O (számított) [m/m %]	Hamutartalom [m/m %]	O/C arány	H/C arány tízszere	Égéshő [MJ/kg]	Fűtőérték [MJ/kg]
Búzaszalma	42,59±0,3	5,69±0,2	0	0	38,59	5,69	0,91	1,34	16,52±0,329	15,1
Repceszalma	43,32±0,3	5,48±0,1	0,01±0	0,75±0,1	37,98	5,47	0,88	1,26	15,85±0,208	14,47
Szőlőnyerge	44,24±0,43	5,7±0,12	0,31±0,1	0	36,26	5,74	0,82	1,29	17,745±0,414	16,3

10. táblázat: Az alapanyagok elemi összetétele és fűtőértéke

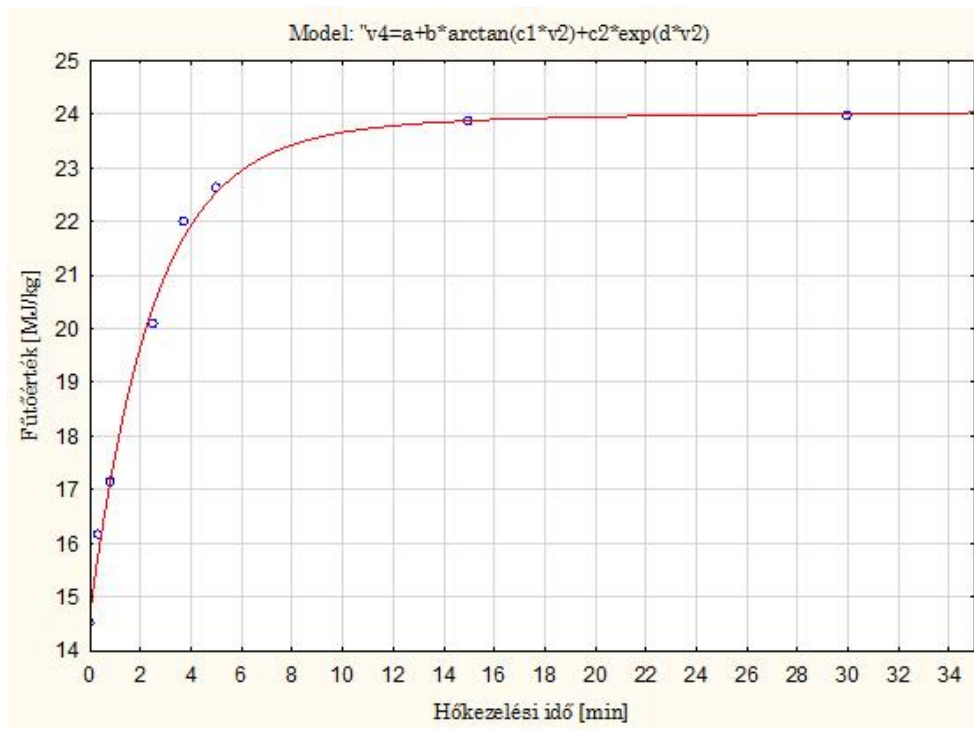
A 10. táblázatban szereplő adatok átlagos mérési eredmények az alapanyagra vonatkoztatva. Ehhez hasonlóan elvégeztem a különböző hőntartási idők után kapott kezelt termékek égéshő és elemi analízis vizsgálatát. Ezekből a 11. táblázatban szereplő fűtőértékeket és az egyes minták energiatartalmát számítottam ki.

	<i>Hőntartási idő [s]</i>	<i>Elért fűtőérték [MJ/kg]</i>	<i>Visszamaradt tömeg [m/m%]</i>	<i>Energia-tartalom [MJ]</i>	<i>O/C arány</i>	<i>H/C arány tíz-szerese</i>
Búza-szalma	20	16,36	82,3	13,46	0,91	1,33
	50	19,62	78,1	15,32	0,9	1,31
	150	21,16	68,3	14,45	0,82	1,18
	225	21,45	59,4	12,74	0,79	1,12
	300	22,1	54,7	12,09	0,66	1,03
	900	23,12	46,1	10,66	0,54	0,89
	1800	23,94	41,7	9,98	0,42	0,76
Repce-szalma	20	16,16	83,6	13,51	0,88	1,26
	50	17,15	79,5	13,63	0,80	1,19
	150	20,08	69,4	13,94	0,73	1,16
	225	21,98	64,8	14,24	0,65	1,14
	300	22,63	60,1	13,60	0,58	1,09
	900	23,86	52,3	12,48	0,45	0,99
	1800	23,97	43,2	10,36	0,35	0,83
Szőlőve-nyige	20	16,79	81,9	13,75	0,82	1,29
	50	17,43	78,6	13,70	0,79	1,23
	150	18,89	70,2	13,26	0,75	1,15
	225	20,88	63,8	13,32	0,68	1,1
	300	22,45	59,1	13,27	0,62	1,01
	900	23,76	49,5	11,76	0,49	0,91
	1800	24,22	42	10,17	0,37	0,7

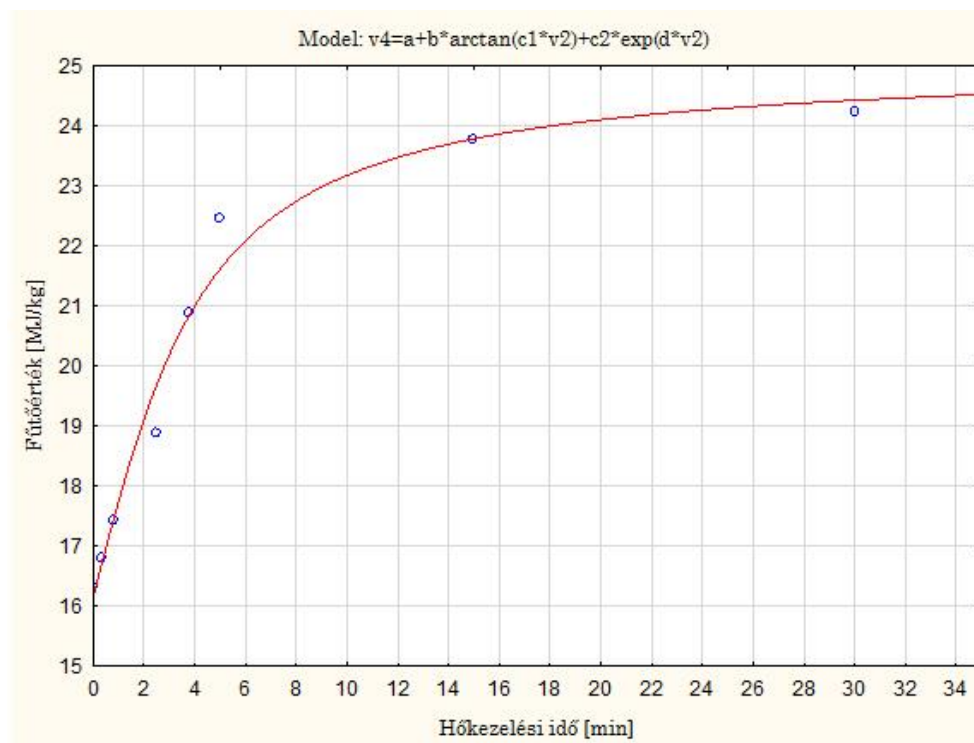
11. Táblázat: A fűtőérték mérések összefoglaló táblázata



14. ábra: Búzaszalma fűtőérték növekedése



15. ábra: Repceszalma fűtőérték növekedése



16. ábra: Szőlővenyige fűtőérték növekedése

Meghatároztam egy általános alakú függvényt mely mindhárom alapanyag fűtőérték növekedésének számításához alkalmas. A függvényt az alábbi alakban lehet felírni:

$$H = a + b \cdot \operatorname{arctg}(c_1 \cdot t) + c_2 \cdot e^{d \cdot t} \quad (5)$$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i> ₁	<i>c</i> ₂	<i>d</i>
Búzaszalma	19,69033	4,63438	1,33531	-4,61103	-0,01541
Repceszalma	22,15554	1,25708	0,34714	-7,453	-0,41463
Szőlővenyige	16,17201	5,67478	0,28577	0	0

12. Táblázat: A közelítő függvény állandóinak értékei mindhárom alapanyagra

A mérési eredmények eloszlásából több függvény alakot kipróbálva jutottam el arra a következtetésre, hogy a függvénynek tartalmaznia kell egy gyors és egy lassú tagot. A függvényközelítések átlagos hibája búzaszalma esetén -0,274%, repceszalma esetén 0,191% illetve szőlővenyigénél -0,17%. A felállított modell egy későbbi energetikai optimalás során lesz elengedhetetlen.

5.3 Numerikus módszer a hőntartási idő-fűtőérték kapcsolat meghatározására

A fűtőérték növekedést az idő függvényében a Levenberg-Marquardt módszerrel (nemlineáris legkisebb négyzetek) közelítettem, melyből megállapítottam egy univerzális függvénykapcsolatot a hőntartási idő és a fűtőérték között. A közelítéshez a Statistica nevű szoftvert használtam, mely a következő alfejezetben leírt módszert alkalmazza.

A Levenberg-Marquardt eljárás szerint úgy deriválunk, hogy a lineáris keresési stratégiát megbízhatósági tartománnyal helyettesítjük. A megbízhatósági tartomány alkalmazása segít a Gauss-Newton módszer egyik gyengeségét kiküszöbölni, nevezetesen, a $J(x)$ Jacobi mátrix alacsonyabb rangú viselkedését, ha az rang-hiányos. A másodrendű Hesse-tagot a

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(x) &= \sum_{j=1}^m \nabla r_j(x) \nabla r_j(x)^T + \sum_{j=1}^m r_j(x) \nabla^2 r_j(x) = \\ &= J(x)^T J(x) + \sum_{j=1}^m r_j(x) \nabla^2 r_j(x) \end{aligned} \quad (6)$$

összefüggésben még mindig elhanyagoljuk azonban, így a két módszer lokális konvergencia tulajdonságai hasonlóak lesznek.

A Levenberg-Marquardt módszer jellemezhető és vizsgálható a megbízhatósági tartomány felhasználásával. Gömb alakú megbízhatósági tartomány esetén minden egyes iterációban megoldandó alprobléma:

$$\min_p \frac{1}{2} \|J_k p + r_k\|_2^2, \quad \|p\| \leq \Delta_k \text{ esetén,} \quad (7)$$

ahol $\Delta_k > 0$ a megbízhatósági tartomány sugara. Az $m_k(p)$ modellfüggvényt a következőképpen választjuk:

$$m_k(p) = \frac{1}{2} \|r_k\|^2 + p^T J_k^T r_k + \frac{1}{2} p^T J_k^T J_k p \quad (8)$$

Legyen $\eta \in \left(0, \frac{1}{4}\right)$, és feltételezzük, hogy az $r_i(\cdot)$ függvények kétszeresen és folytonosan differenciálhatók a $\mathcal{L} = \{x | f(x) \leq f(x_0)\}$ szint környezetében, valamint az (6) összefüggésbeli p_k közelítő megoldása minden egyes k -ra kielégíti a következő egyenlőtlenséget:

$$m_k(0) - m_k(p_k) \geq c_1 \|J_k^T r_k\| \min\left(\Delta_k, \frac{\|J_k^T r_k\|}{\|J_k^T r_k\|}\right) \quad (9)$$

ahol $c_1 > 0$ állandó. Ekkor kapjuk, hogy

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \nabla f_k = \lim_{k \rightarrow \infty} J_k^T r_k = 0.$$

Az $r_i(\cdot)$ -re érvényes érzékenységi feltétel magában foglalja, hogy $\|J^T J\|$ és $\|\nabla^2 f\|$ is korlátozottak a \mathcal{L} környezetében.

Nincs szükség a (8)-as számú egyenlőtlenség jobb oldalának kiszámítására vagy explicit módon történő ellenőrzésére. Ehelyett egyszerűen előírhatjuk a csökkenést, amely (6)-ban előforduló p_k közelítő megoldásából adódik, egészen addig, amíg ez a csökkenés el nem éri a Cauchy-pontot.

Rögzítsük az iterációt a k -adik lépés közben, és koncentráljunk a (6) számú alproblémára. Ez akkor lép fel, mikor az (6) összefüggés megoldását a következő módon karakterizáljuk: amikor az (6) számú Gauss-Newton összefüggések p^{GN} megoldása teljes egészében a megbízhatósági tartományba esik (azaz $\|p^{GN}\| < \Delta$), akkor ezzel egyidejűleg p^{GN} megoldása lesz az (6) alproblémának is. Egyébként, amennyiben $\lambda > 0$, úgy a (6) formulára kapott $p = p^{LM}$ megoldás kielégíti $\|p\| = \Delta$ és

$$(J^T J + \lambda I)p = -J^T r \quad (10)$$

Ezt a követelményt igazolja a következő lemma: a p^{LM} vektor az alábbi megbízhatósági tartomány alprobléma

$$\min_p \|Jp + r\|_2^2, \quad \|p\| \leq \Delta \text{ esetén,}$$

megoldása néhány $\Delta > 0$ -ra akkor és csak akkor, ha $\lambda \geq 0$, és oly módon, hogy

$$(J^T J + \lambda I)p^{LM} = -J^T r \quad (11a)$$

$$\lambda(\Delta - \|p^{LM}\|) = 0. \quad (11b)$$

A szemidefinitésgé feltétel automatikusan kielégül, hiszen $J^T J$ pozitív szemidefinit és $\lambda \geq 0$. Egyébként a (9) összefüggés egy lineáris legkisebb négyzetes probléma normált alakja:

$$\min_p \frac{1}{2} \left\| \begin{bmatrix} J \\ \sqrt{\lambda} I \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} r \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (12)$$

Ugyanúgy ahogyan a Gauss-Newton esetében, a (9) és (11) között fennálló egyenlőség határozza meg az alprobléma megoldásának módját anélkül, hogy ki kellene számítani a $J^T J$ mátrix-mátrix szorzatát és annak Cholesky-faktorizációját.

A Levenberg-Marquardt algoritmus eredeti meghatározása [30][31] még nem teremtett összefüggést a „trust region” koncepcióval. Ehelyett közvetlenül változtatta a (9)-ben szereplő λ értékét – egy meghatározott faktoron keresztül növelve vagy csökkentve azt, aszerint, hogy a megelőző próbálépés hatásosan csökkentette-e $f(\cdot)$ értékét. A λ változtatására vonatkozó heurisztikus lépések igen hasonlatosak a Δ_k megbízhatósági tartomány sugár változtatására használtakhoz. Hasonló konvergencia-eredmények hasonló megközelítéssel igazolhatók [32], függetlenül a megbízhatósági tartomány analízistől. A megbízhatósági tartománnyal való első határozott kapcsolatot Moré [33] vetette papírra. A megbízhatósági tartomány nézőpontot érdekes módon elméleti és gyakorlati megközelítéssel is sikerült bizonyítani, azóta pedig egyre nő a hatékonysága az egyre pontosabb szoftvereknek köszönhetően.

6. A pörkölés energetikai számítása és vizsgálata

A pörkölés végén magasabb fűtőértékű tüzelőanyagot kapunk, de ahhoz, hogy elérjük ezt a kedvező tulajdonságot hőenergiát kell befektetni. Jelen fejezetben elvi és gyakorlati úton bemutatom, hogy a hőkezeléshez mekkora hőbefektetés szükséges. A kezelés végeredménye egy magasabb fűtőértékkel rendelkező tüzelőanyag, mely hidrofób tulajdonságokkal rendelkezik [34]. A hidrofób tulajdonság lehetővé teszi, hogy a tüzelőanyagot kedvezőbb feltételek mellett tároljuk. A hidrofobitás azt jelenti, hogy a tárolás alatt sokkal több időnek kell eltelnie ahhoz, hogy vizet vegyen fel a tárolt anyag [17]. Ez egyértelműen olcsóbbá teszi a tárolást.

A folyamatot matematikai modellel közelítettem, melyet MathCAD szoftverben írt programmal oldottam meg. Mivel sok ismeretlen paraméter adódik a folyamat leírása során (például a szalmák fajhőjének hőmérsékletfüggése, vagy a kémiai reakciók időbeni lefolyása, illetve ezek energiaigénye) ezért a pontos hőigényt mérésrel tudtam meghatározni. Alapvetően a termokémiai folyamat két szakaszra bontható: az egyik a felfűtési szakasz, a második pedig a hőbontás, azaz a kémiai reakciók szakasza. Ez a két szakasz a valóságban nem választható szét, mivel a hemi-cellulóz bomlása már 220°C-on elindul és csupán a hőtani modellezésben bontottam két részre. A hőtechnikai modell megalkotása során azt feltételeztem, hogy a felfűtési szakaszban csak a nedvesség távozik el a mintából, kémiai reakciók nem történnek.

A nulladik időpillanatban a kezelendő anyagon (pl.: búzaszalma) kívül csak nagyon kis mennyiségű levegő található meg a kemencében, mivel vákuumozással a nyomást 0,1 bar_a-ra csökkentem. A búzaszalma és repceszalma fajhőjét a [35][36]-es szakirodalmi forrásokból nyertem, míg a szőlővenyige fajhőjét szakirodalmi adatok hiányában a fenyőfa fajhőjével helyettesítettem, mivel kémiai összetétele hasonló.

A rendszer felfűtéséhez szükséges hőáramot az entalpia megmaradási elv alapján a (13)-as összefüggéssel tudjuk meghatározni. A (13)-es összefüggés fajlagos tömegegységre vonatkoztatott entalpiaáram.

$$\frac{di}{dt} = \frac{d(c_p \cdot T)}{dt} \quad (13)$$

Az összefüggés figyelembe veszi, hogy a rendszer fajhője időben változó, mivel a felfűtés során a szilárd anyag szárad, vízgőz kerül a páratérbe. További feltétel, hogy a felfűtést kis mennyiségű levegő jelenlétében indítjuk, így a levegő felmelegítéséhez szükséges energiaigényt is figyelembe kell venni. Ezért a felfűtési szakaszban a rendszer hőigénye adódik egyszer a szilárd anyag, másodszor a folyamatosan elpárolgó víz (0,1 bar_a nyomáson a víz forráspontja 45,5 °C) valamint a levegő hőigényéből [37]. A rendszer energiaigényét az idő

függvényében írtam le úgy, hogy a levegő tömegét állandónak tekintem a felfűtési szakaszban. Elkezdem melegíteni a rendszert (zárt állapotú elzáró), majd amikor a nyomás eléri az 1,2 bar_g-t, a szelep nyitásával állandó értéken tartom. A minta tömegcsökkenéséről azt feltételezem, hogy a felfűtési szakaszban csak a nedvesség távozik el belőle.

A rendszer felfűtéséhez szükséges hőmennyiséget az alábbi integrális összefüggéssel tudjuk meghatározni. Mindezek mellett számottevő energiaigény lehet a víz elpárologatása, illetve a telítetlen vízgőz felmelegítése az adott 280°C-ra. A (23)-as összefüggésben szerepel a szilárd tömeg ($m_o(\tau)$), melynek változását az idő függvényében a 18. ábrán láthatjuk.

$$Q_{felfűtés} = \int_{\tau_0}^{\tau_1} c_{szilárd}(\tau) \cdot (m_{összes} - \dot{m}_o(\tau)) \cdot \Delta T d\tau + (I_{R2} - I_{R1}) + \int_{\tau_{nyit}}^{\tau_1} \dot{m}_o(\tau) \cdot i_{kilépő}(\tau) d\tau \quad (14)$$

ahol a rendszer entalpiája végállapotban,

$$I_{R2} = m_L \cdot i_2 + \xi_{n2} \cdot m_T \cdot c_{víz} \cdot T_2 \quad (15)$$

és a rendszer entalpiája kiindulási állapotban,

$$I_{R1} = m_L \cdot i_1 + \xi_{n1} \cdot m_T \cdot c_{víz} \cdot T_1. \quad (16)$$

Továbbá a nedves levegő fajlagos entalpiája 1 kg száraz levegőre vonatkoztatva számítható, ha a levegő telítetlen állapotban van

$$i = c_{plev} \cdot T + x \cdot (c_{pg} \cdot T + r_0) \quad (17)$$

a (15)-(16) összefüggésben található száraz levegő tömegét pedig a következő összefüggéssel tudjuk meghatározni:

$$m_L = \left[\frac{p}{R_{lev} \cdot (T + 273,15)} - \left(\frac{1}{R_{lev}} - \frac{1}{R_g} \right) \cdot \frac{p_{gtel}(T)}{(T + 273,15)} \right] \cdot \frac{1}{1 + x} \cdot V_{nL} \quad (18)$$

ahol, a nedves levegő térfogatát pedig az alábbi összefüggéssel tudjuk megadni:

$$V_{nL} = V_R - \frac{m_T}{\rho_T} \quad (19)$$

ahol az abszolút nedvesség

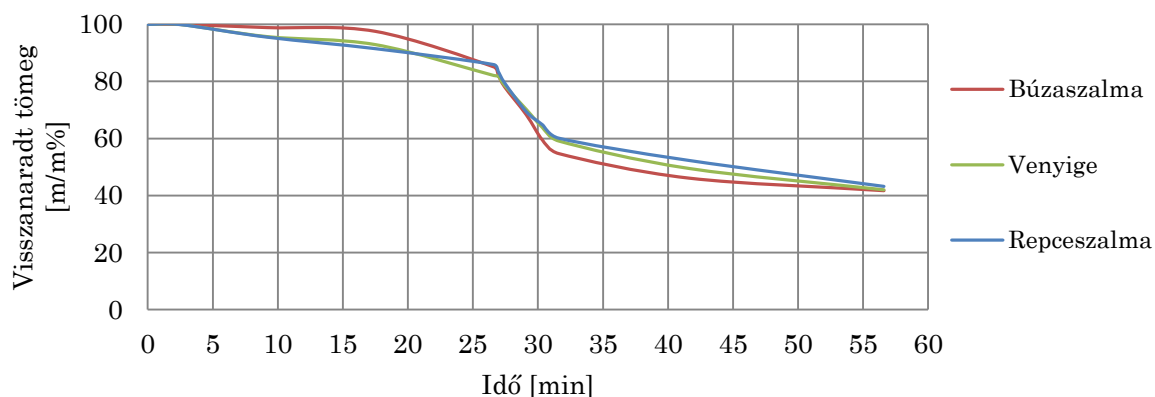
$$x_1(\phi, t, p) = \frac{R_{lev}}{R_g} \cdot \frac{p_{gtel}(T)}{\frac{p}{\phi} - p_{gtel}(T)} \quad (20)$$

illetve a relatív nedvesség

$$\phi(x, t, p) = \frac{x}{\frac{R_{lev}}{R_g} + x} \cdot \frac{p}{p_{gtel}(T)} \quad (21)$$

A (14) egyenlet megoldása után a felfűtési energiaszükséglet:

$$Q_{felfűtés} = 20,231 \text{ kJ}$$

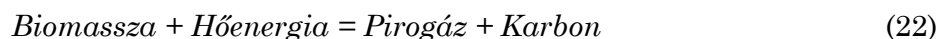


17. ábra: A három minta tömegváltozása az idő függvényében

A kilépési ponton elmenő gáz entalpiáját hozzá kell adni a rendszer felfűtéséhez szükséges entalpiához, a (14)-es egyenletben szereplő harmadik tag erre utal. A kiindulási tömegből, ha levonjuk a pillanatnyi tömeget megkapjuk az eltávozó mennyiséget, ezt kell a gáz fajlagos entalpiájával szorozni, hogy megkapjuk az eltávozó gáz teljes entalpiáját.

A felfűtési energiaigényt befolyásolja a kemence által leadott és az acél kapszula által felvett hőmennyiség is. Nyilvánvalóan az adott anyag felmelegítéséhez szükséges energiamennyiség nem változik, de a hőátadás jósága természetesen romlik (így nő a kezeléshez szükséges hőmennyiség) egy rossz hőátadási képességgel rendelkező kemencében.

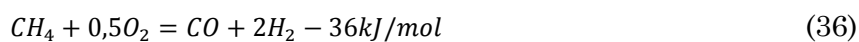
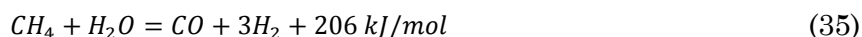
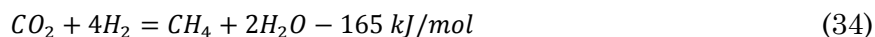
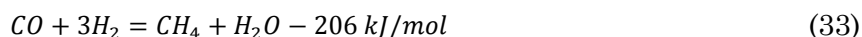
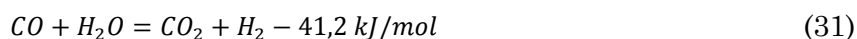
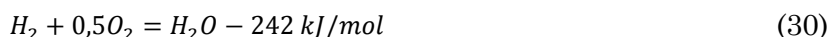
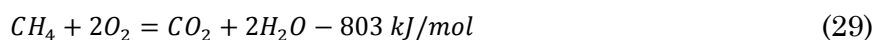
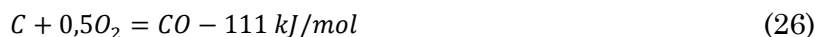
A reakcióhoz szükséges hő meghatározásánál azt feltételeztem, hogy csak a hőtartási idő alatt játszódnak le a reakciók, a hőkezelési hőmérséklet eléréséig csak nedvesség távozik el. A képződéshőket, és a reakcióhőket[38] figyelembe kellene venni a hőtartási szakaszban. Az irodalomban [13][39][40] fellelhető bomlási reakciókat figyelembe véve, az alábbi egyenletet kapjuk [41]:



Ez azt jelenti, hogy a beadagolt alapanyaggal, ha hőt közlünk akkor szén, illetve gázok képződnek. A pirogáz több gáz keveréke, található benn szén-dioxid, szén-monoxid, metán, nitrogén, vízgőz.

Amennyiben az összes illó eltávozik, azaz az alapanyagot kigázosítjuk, úgy a visszamaradt faszénben elemi szén és egyéb ásványi anyagok maradnak, mint például a kálium, klór[42]. Ezek a mezőgazdasági melléktermékekben a műtrágyákból származó komponensek.

Az alábbi reakciók energiaigényét kell figyelembe venni, melyek egy részének lezajlását a gázelemzés is igazolt. A reakciók pontos ismeretéhez és azok hőenergia igényének meghatározásához további elemzések elvégzése lenne indokolt, melyek elvégzése túlmutat a doktori disszertációm kitűzött céljain.



A hőntartási szakaszban lejátszódó reakciók ismeretének hiányában a felfűtési szakasz hőigényét méréssel is igazoltam, viszont a hőntartási szakasz hőigényét kizárólag méréssel határoztam meg.

A vizsgálat menete:

- Kemence felfűtése üzemi hőmérsékletére.
- Üres kapszula levákuumozása.
- Elektromos fogyasztásmérő műszer lenullázása.
- Mérés.

Ezután a 15 perces hőntartást vizsgáltam, mértem a kemence és a kapszula hőveszteségét és a 15 perc eltelte után regisztráltam a kemence elektromos áram fogyasztását.

A következő mérési sorozatot a vizsgálandó közeggel töltött állapotban végeztem el (a teljes kapacitása a kapszulának 50 gramm). A két mérés különbsége adja a szalma felfűtéséhez, illetve a hőntartáshoz szükséges energia mennyiségét. Az ellenállás fűtésű kemencék hatásfokát tapasztalati úton 95% értéken veszem figyelembe.

Ezek alapján megállapítható az alapanyag pörköléséhez szükséges befektetett energia mennyiségét.

A 13. táblázatban láthatjuk a búzaszalmával végzett mérések eredményeit, illetve a pörköléshez szükséges energia mennyiségét is.

A táblázat celláiban 5-5 mérés átlagos értékei láthatók 50 grammra vonatkoztatva, ahol a kemence villamos hatásfokát is vettem figyelembe vettem.

	Üres kemence kapszulával (vákuum) e_1 [kJ]	Szalma (vákuum) e_2 [kJ]	Különbség (csak szalma) $e_2 - e_1$ [kJ]
Vákuumozás	3,6±0	3,6±0	0
Felfűtés	864±10,8	889,2±7,2	25,2
Hőntartás	108±3,6	230,4±10,8	118,8
		Összesen	144

13. Táblázat: A hőkezeléshez szükséges energia mennyiségének meghatározása méréssel 50 g közegre

A vákuumozás energiaszükségletének mérése során üres kemence és szalmával töltött kemence esetén megegyezett, ez a porozitás miatt lehetséges. Mivel ez a két érték nem egyezhet meg, ezért a mérés indítási állapotában a rendszer porozitását megmértem. A szalma és az üres tér arányát mértem meg, mely 0,95-ra adódott, amely már magyarázatot ad, miért lehet azonos a mért energiaszükséglet. Ezért hiába a mérések különbsége zérust ad, hozzáadtam az összesített energiaszükségletéhez.

A 13. táblázatban látható mért értékek átválthatók [MJ/kg] dimenzióra.

$$E = (e_2 - e_1) \cdot m \quad (37)$$

$$E = (e_2 - e_1) \cdot \frac{1000}{50}$$

$$E = 3,11 \frac{MJ}{kg}$$

A pörkölés energetikai hatásfokát (konverziós fokát) az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni.

$$\eta = \frac{H_{pörkölt} \cdot m_{pörkölt}}{H_{alapanyag} \cdot m_{alapanyag} + E} \cdot 100[\%] \quad (38)$$

Hőntartási idő [s]	Elért fűtőérték [MJ/kg]	Visszamaradt tömeg [m/m%]	Energia-tartalom [MJ]	Energia-tartalom alapanyagra [MJ]	A pörkölés energetikai hatásfoka [%]
900	22,1	46,1	10,18	15,08	62,6

14. táblázat: A pörkölés energetikai, konverziós hatásfoka

Javíthatunk a konverziós hatásfokon, amennyiben a képződő gázokat is hasznosítjuk. A hőkezelés során a 15 perces hőntartási idő alatt felszabaduló gázok minőségi elemzését is

végrehajtottuk. A minőségi gázelemzésből adódtak a gázt alkotó vegyületek, így számítás-sal meg tudtam határozni a pirogáz fűtőértékét. A gázt gázkromatográffal vizsgáltuk meg mely szintén a Hőenergia és Tüzeléstani Intézeti Tanszéken leltározott. A gázkromatográfós vizsgálat eredményeit a 15. táblázatban láthatjuk.

	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	H ₂ S	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	Összesen
Minta-vétel	tartalom [V/V%]									
1	51,1	0,2	0,8	0,0	0,0	0,7	4,7	1,0	33,5	92,0
2	50,6	0,2	1,2	0,0	12,6	0,2	1,3	1,7	31,4	99,2
Átlag	50,84	0,2	1	0	6,3	0,45	3	1,35	32,46	95,63

15. táblázat: A kromatográfós gázelemzés eredménye

A gázkeverék sűrűségének meghatározásához Peng-Robinson modellt alkalmaztam, feltételezve, hogy poláris és reális anyagok találhatóak meg a pirogázban. A kromatográfós vizsgálat alapján felvehetjük a 16. táblázatot.

	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	H ₂ S	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	
Mol tört	0,51	0,0021	0,01	0,00	0,06	0,004	0,03	0,01	0,32	1
Fűtőérték [MJ/m ³]	0	58,2	54,2	0	9,9	0	0	32,7	9,9	4,95
Energia-tartalom	0	0,12	0,54	0	0,62	0	0	0,45	3,21	4,95

16. táblázat: Az egyes komponensek mol törtjei és fűtőértékei a pirogázban

Az összegzett energiatartam adja a gázkeverék fűtőértékét, mely 4,95 MJ/m³. Ahhoz, hogy meghatározzuk az egységnyi tömegre vetített fűtőértéket ismernünk kell a gáz sűrűségét, mely 1,357 kg/m³, így a keverék gáz fűtőértéke 3,64 MJ/kg-ra adódik. Ezt felhasználva a 16. táblázatban található eredményeket határoztam meg.

Amennyiben a képződő gázokat is hasznosítjuk az alábbi konverziós hatásfokot tudjuk felírni [43].

$$\eta = \frac{H_{\text{pörkölt}} \cdot m_{\text{pörkölt}} + H_{\text{pirogáz}} \cdot m_{\text{pirogáz}}}{H_{\text{alapanyag}} \cdot m_{\text{alapanyag}} + E} \cdot 100[\%] \quad (39)$$

Elért fűtőérték [MJ/kg]	Visszamaradt tömeg [m/m%]	Energia-tartalom [MJ]	Energia-tartalom pirogáz [MJ]	Energia-tartalom (alapanyag) [MJ]	A pörkölés energetikai hatásfoka [%]
22,1	46,1	10,18	1,96	15,08	74,6

17. táblázat: A pörkölés energetikai, konverziós hatásfoka, ha a gázokat is hasznosítjuk

A két eredményt összehasonlítva megállapítható, hogy 15 perces hűntartási idő mellett 12%-kal magasabb a konverziós fok, ha a pirogázt is hasznosítjuk. A jövőbeni kutatásaink fontos lépése a hőkezelési ciklusidők (felmelegítés, hűntartás) optimalizálása, amely jelen dolgozatunknak nem képezte tárgyát.

7. Az eredeti és hőkezelt minták hamu lágyulási jellemzőinek vizsgálata

Mivel egy új tüzelőanyagot előállítására történt, és már a fűtőérték növekedése ismert a hőntartási idők függvényében, a tüzelőanyag más fontos tüzeléstani vizsgálatait érdemes elvégezni, hogy egy teljesebb képet kapjunk a fűtőanyag tulajdonságairól.

Jelen fejezetben bemutatom, hogy a kiindulási anyagok hamujának lágyulási hőmérséklete hogyan változik a hőkezelés hatására. Az erőművi tüzelőberendezésekben a fűtőanyag elégetésekor keletkező hamu adott körülmények között károsíthatja a szerkezeti elemeket. A károsodás mértéke függ a keletkező szilárd égési maradék kémiai és ásványi összetételétől, de a hamu szintereződési, lágyulási illetve olvadási tulajdonságaitól is. A hamulágyulási vizsgálatokat a hőkezelt tüzelőanyagokra végeztem el.

7.1 A hamu lágyulási hőmérsékletének vizsgálata

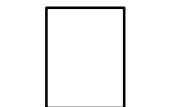
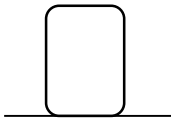
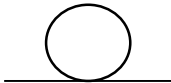


7.1.1 Vizsgálati eljárás

Jelen esetben a méréseket a Hőenergia és Tüzeléstani Intézeti Tanszéken található SYLAB IF2000G típusú készülékkel végeztük és határoztuk meg a tüzelőanyagok lágyulási hőmérsékletét. A készülék szenek és biomassza hamuk lágyulási tulajdonságainak vizsgálatára szolgál. A SYLAB készülék az ismertett kísérletek közül az első módszert alkalmazza. [44]

A SYLAB IF2000G készülék egy 1700 °C-ig fűthető kemence (18. ábra), melynek cső alakú munkatere tartalmazza a mintát és a kemenceteret is. Található benne egy lágyulási pont mérő, melyben van a kemencetér és a kemencehőmérséklet külső szabályozó berendezése is. A lágyulási hőmérséklet mérő számítógéppel kommunikál RS232 porton keresztül, az adatgyűjtő szoftvere a számítógépen rögzíti a mért adatokat. A rendszer része még egy digitális kamera a próbatest fényképezésére. Egy tüzelőanyag hamujának olvadási pontját a 18. táblázat szerinti hőmérsékleti pontokkal jellemezhetjük.

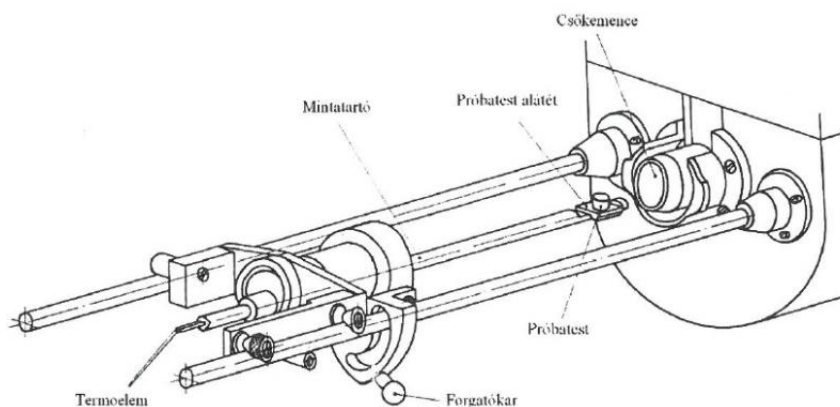


18. ábra: A SYLAB IF2000G mérő berendezés [44]

Hőmérséklet	Jelölés	Rövid leírás	Próbatest alak
Szintereződési hőmérséklet	IT	Az a hőmérséklet, ahol a próbatest magassága az eredetihez képest 5%-ot csökkent.	
Deformációs pont	DT	Az a hőmérséklet, ahol a minta elkezd lágyulni, lekerekedik az éle, kipúposodik a teteje. Ez a lágyulás kezdetének hőmérséklete.	
Gömb hőmérséklet	ST	Az a hőmérséklet, ahol a minta alakja egy gömbre hasonlít.	
Félgömb hőmérséklet	HT	Az a hőmérséklet, ahol a minta alakja egy félgömbre hasonlít, a megolvadt mintadarab magassága fele a gömb átmérőjének.	
Folyási hőmérséklet	FT	Az a hőmérséklet, ahol a próbatest magassága fele a félgömb átmérőjének. Teljes olvadás tapasztalható.	

18. Táblázat: A hamu lágyulásának jellegzetes hőmérsékletei pontjai

A mérést a tüzelőanyag hamujának formázásával kell kezdeni. Annyi 96 V/V%-os alkoholt kell cseppenteni a hamuba, hogy jól formázható, képlékeny állagú legyen. A próbatest készítése során 3 mm magas és 3 mm átmérőjű hengert készítünk és ennek viselkedését elemezzük a hőmérséklet függvényében. A formázás után a hőálló lapkára rakott tálcával együtt óvatosan a kemence tartótálcájára kell helyezni (17. ábra). A minta behelyezése után indul a mérés. A mérést az ISO 540:2008-as szabvány alapján végeztem, a berendezés több szabvány szerinti mérésre is alkalmas.

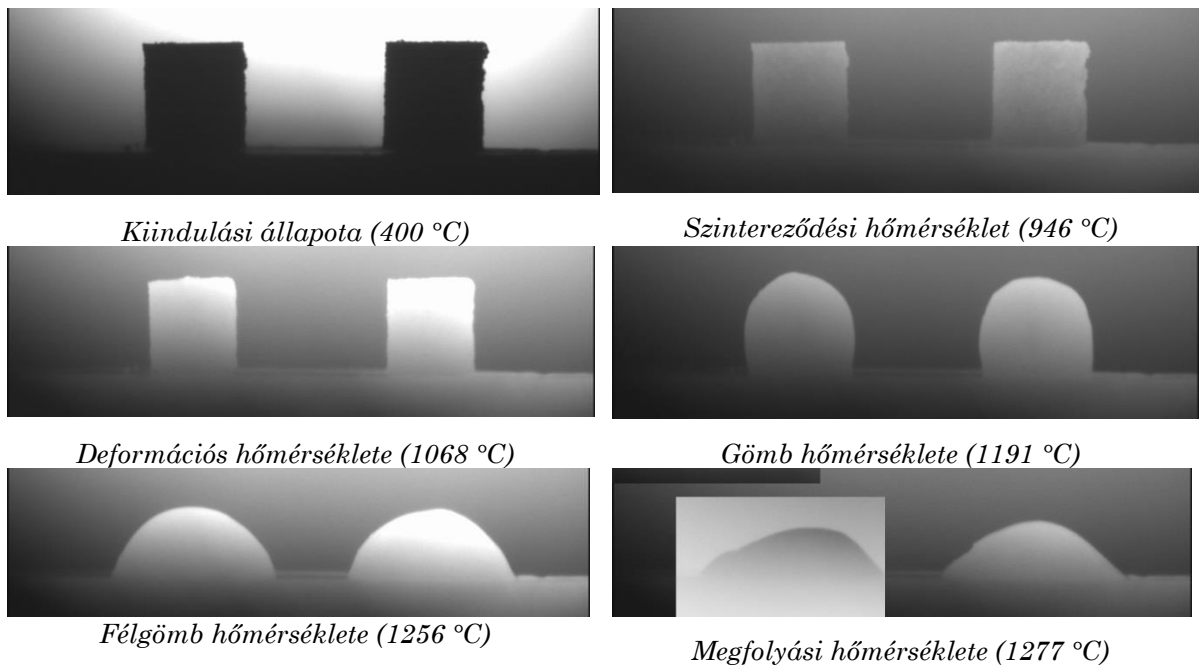


19. ábra: A csökemence felépítése

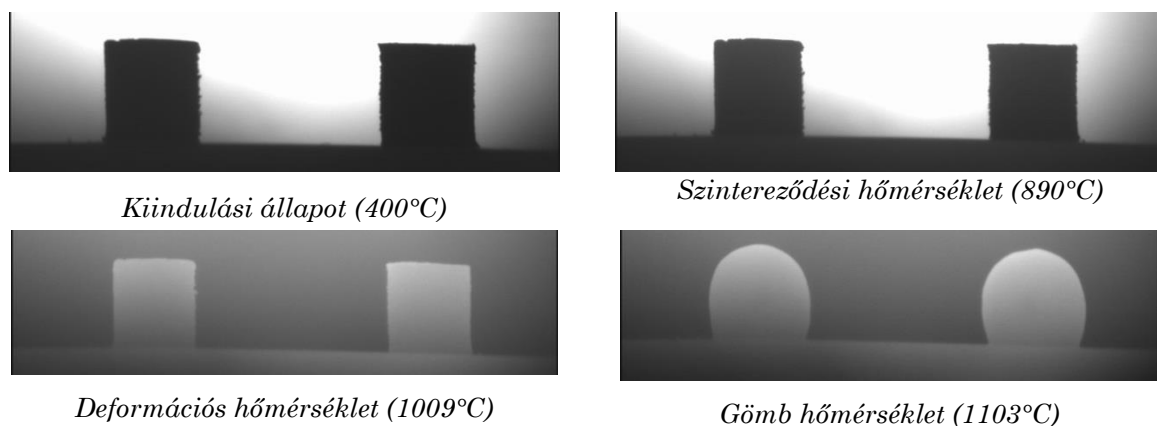
Ebben a szabványban előre meghatározott felfűtési sebességet (10 °C/min) kell alkalmazni 1550 °C-ig, de legalább addig, míg a próbatest teljes elfolyását nem tapasztaljuk [45]. A vizsgálat során a kamera 400 °C fölött 5 °C-onként készít egy-egy képet a mintadarabról. A fényképek alapján tudom meghatározni a lágyulás jellemző hőmérsékleti pontjait [44].

7.1.2 Mérési eredmények elemzése

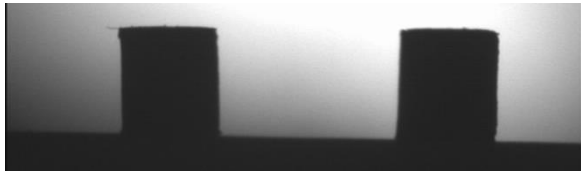
A 18. táblázat szerinti alakok fényképfelvételeit és a hozzájuk tartozó hőmérsékleti jellemzőket a 20. ábrán láthatjuk. Egymást követően az alapanyag és a pörkölt termékhez tartozó értékeit.



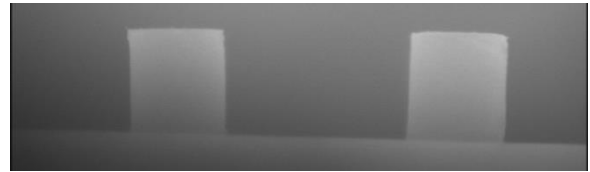
20. ábra: Búzaszalma vizsgálata



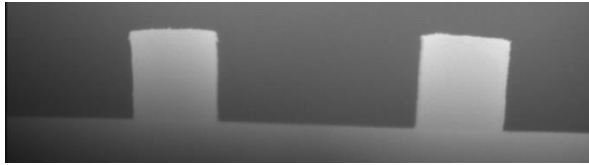
21. ábra: Pörkölt búzaszalma vizsgálata



Kiindulási állapot (400 °C)



Szintereződési hőmérséklet (989 °C)



Defomációs hőmérséklet (1427 °C)



Gömb hőmérséklet (1492 °C)



Félgömb hőmérséklet (1502 °C)



Megfolyási hőmérséklet (1507 °C)

22. ábra: Repceszalma vizsgálata



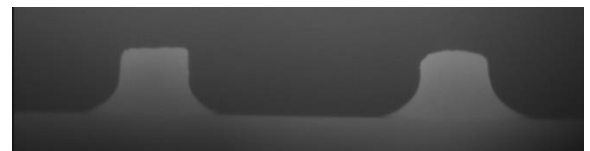
Kiindulási állapot (400 °C)



Szintereződési hőmérséklet (991 °C)



Deformációs hőmérséklet (1347 °C)



Gömb hőmérséklet (1378 °C)



Félgömb hőmérséklet (1383 °C)



Megfolyási hőmérséklet (1396 °C)

23. ábra: Pörkölt repceszalma vizsgálata



Kiindulási hőmérséklet (400°C)



Szintereződési hőmérséklet (1387°C)



Deformációs hőmérséklet (1512°C)

24. ábra: Szőlővenyige vizsgálata



Kiindulási hőmérséklet (400°C)



Szintereződési hőmérséklet (1383°C)

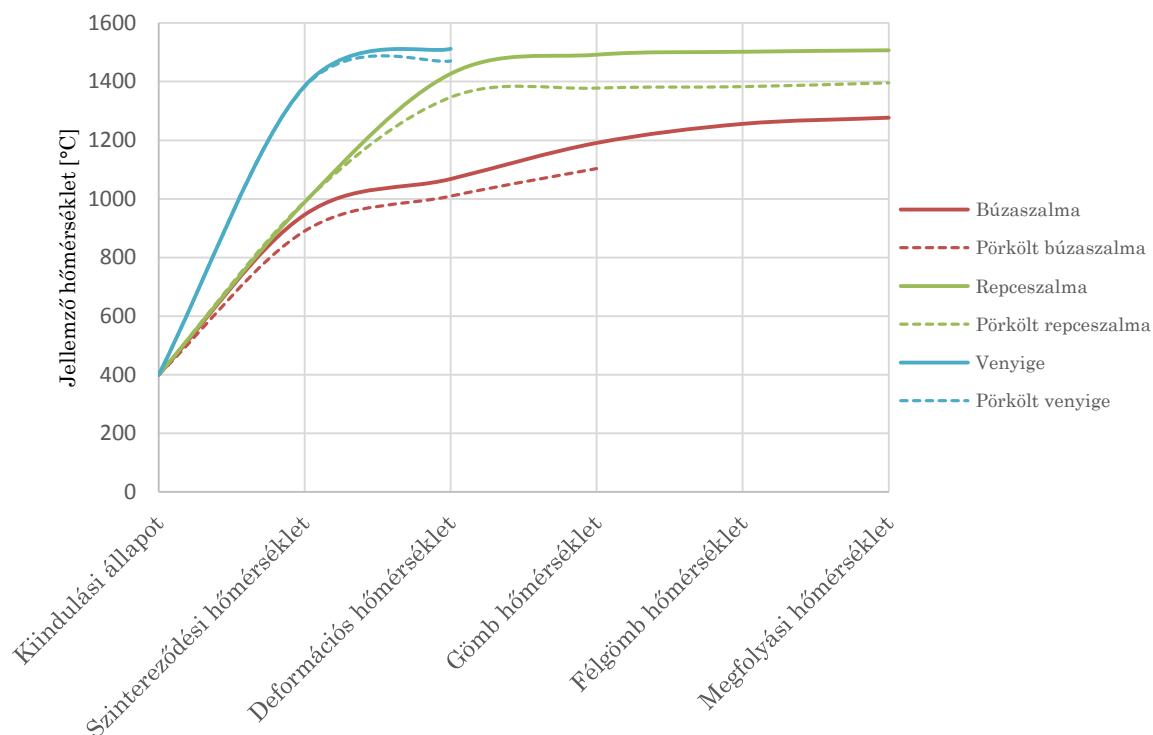


Deformációs hőmérséklet (1471°C)

25. ábra: Pörkölt szőlővenyige vizsgálata

7.1.3 A mérési eredmények összegzése

A hamu lágyulási hőmérséklet méréseinek összegzése a 26. ábrán látható. A mérések során előfordult, hogy a mérést végző automatika leállította a mérést hamarabb, mint 1550 °C, mert tévesen azt érzékelte, hogy megfolyt a minta. Többszöri ismétlés után is mindig ugyanezt az eredményt kaptam vissza, ezért néhány esetben hiányosak a fényképek, illetve az adatok. A szőlővenyige mérései során pedig azt tapasztaltam, hogy a műszer mérési tartományán kívül esik a gömb-, a félgömb-, illetve a megfolyási hőmérséklet. A pörkölés hatására sem tapasztaltam jelentős változást a másik két anyaggal ellentétben. A mérési eredményeket kiértékelve megállapíthatom, hogy a pörkölés a nagy kálium tartalmú anyagok hamu lágyulási hőmérsékletét csökkenti.



26. ábra: A hamu lágyulási pont jellemző hőmérsékletei a különféle alap- és kezelt anyagokra

	Búza- szalma [°C]	Pörkölt búza- szalma [°C]	Különb- ség [°C]	Repe- szalma [°C]	Pörkölt repe- szalma [°C]	Különb- ség [°C]	Venyige [°C]	Pörkölt venyige [°C]	Hőmér- séklet- különb- ség [°C]
	400	400	0	400	400	0	400	400	0
IT	946	890	-56	989	991	2	1385	1383	-2
DT	1068	1009	-59	1427	1347	-80	1512	1471	-41
ST	1191	1103	-88	1492	1378	-114	-	-	-
HT	1256	-	-	1502	1383	-119	-	-	-
FT	1277	-	-	1507	1396	-111	-	-	-

19. Táblázat: A hamu lágyulási pont jellemző hőmérsékleteinek összefoglaló táblázata

7.2 Elektronmikroszkópos vizsgálat

7.2.1 Vizsgálati eljárás

A biomassza tüzelőanyagnál folyamatos égetésnél mindig probléma az alacsony lágyulási hőmérséklet. A lágyszárú növényeket hasznosító erőművekben gyakori probléma, mert ráolvad a szerkezeti elemekre, mely hőszigetelőként viselkedik, ezáltal rontva a hőátadást. A lágyszárú növények alacsony lágyulási pontja főként a kálium és a nátrium tartalom okozza [46]. Ezért célszerű lenne a vizsgálatunkat kiegészíteni kálium tartalom

meghatározására. A hamulágyulási pontok csökkenésére magyarázatot adhat az elektronmikroszkópos vizsgálat eredménye. A vizsgálatokat a Műszaki Anyagtudományi Kar, Anyagtudományi Intézetében végeztük el egy Zeiss EVO MA 10 típusú elektronmikroszkóppal. Az elemzés során a hamu felületét „bombázzuk” elektronokkal, és az egyes elemek atomjai – Bohr-féle modell alapján – körül keringő elektronokat mozdítunk ki a pályájukról. Az elektronok elmozdításához szükséges energia alapján meghatározhatóvá válik, hogy milyen elemek találhatóak a mintában. A méréseket az alábbi képen látható mikroszkóppal végeztük el.

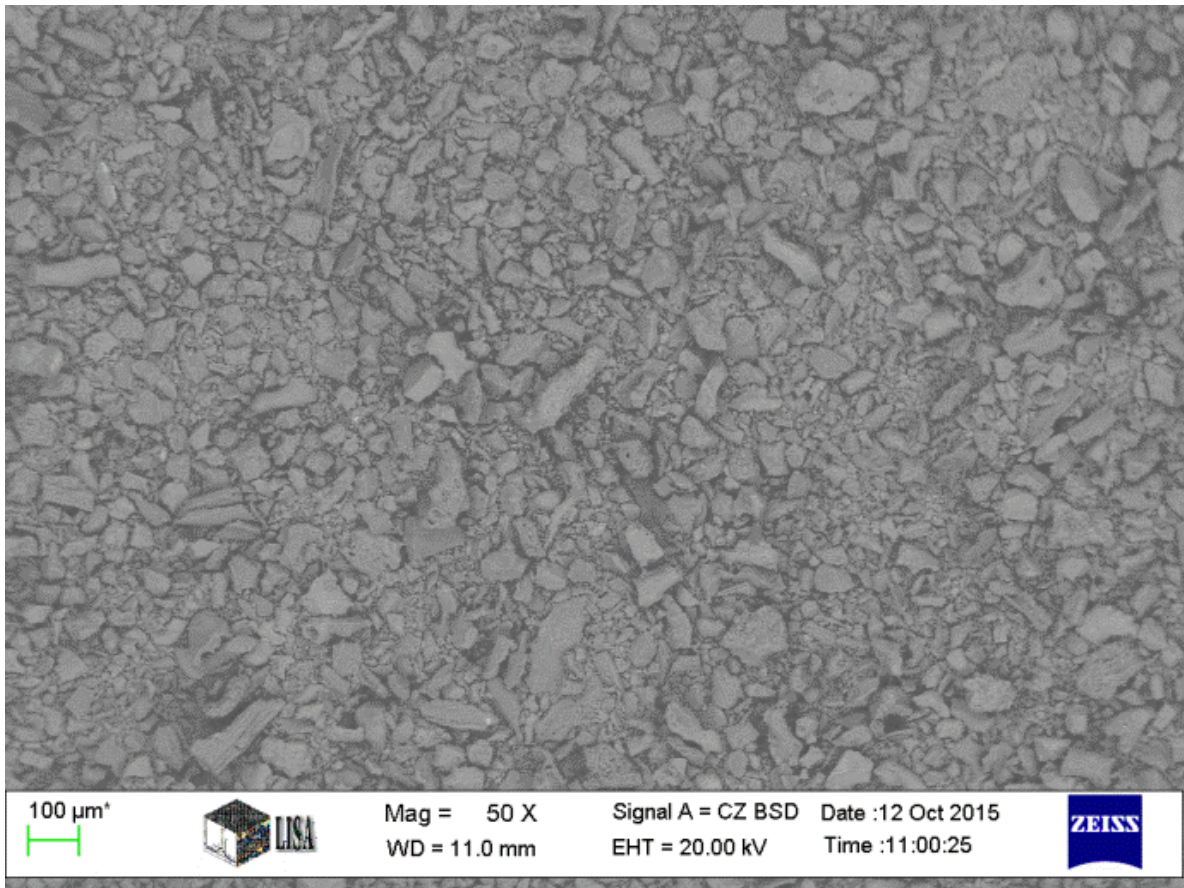


27. ábra: A Zeiss EVO MA 10 típusú elektronmikroszkóp

A vizsgálatokat során az eredeti és hőkezelt mintákat különböző nagyítással vizsgálata meg a berendezés, mindegyik nagyításhoz rendelt egy-egy spektrumot. A felvett spektrumok alapján meg tudjuk állapítani a kálium és nátrium tartalmat.

Először az alapanyag hamujának elektronmikroszkópos felvételeit közlöm, majd a felvétel alapján elkészült spektrumot, így az összetartozó spektrumok egymás alatt láthatók majd a jobb összehasonlítás végett.

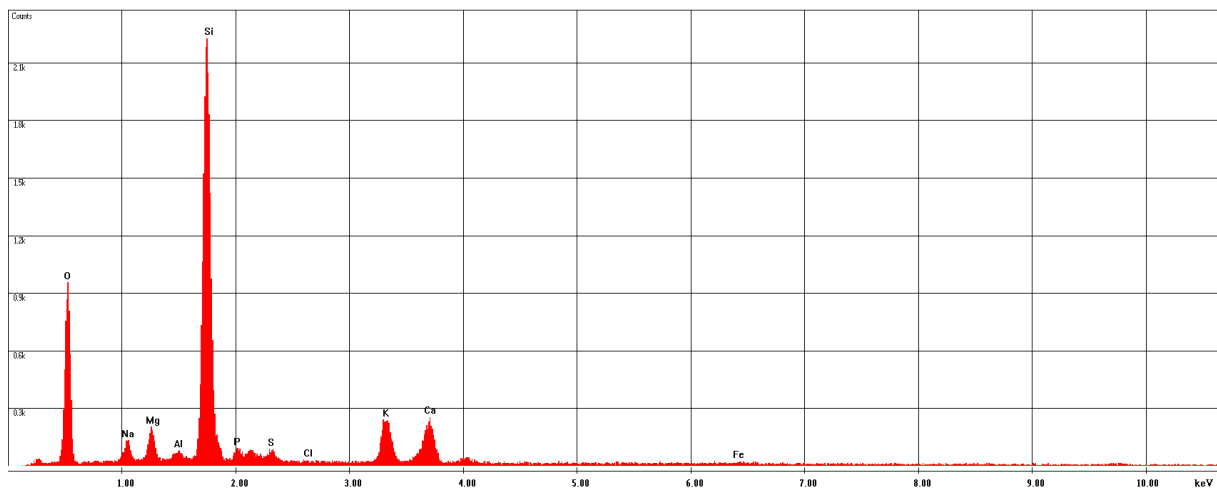
Az elektronmikroszkópos vizsgálat mennyiségi vizsgálatra azonban nem alkalmas, így a keletkezett hamuban található tényleges elemek pontos mennyisége nem állapítható meg. A felvett kép alapján meghatározható az egyes elemek intenzitása a mintában. A vizsgálat alkalmas arra, hogy megállapítsuk, van-e változás az eredeti mintához képest a pörkölt mintában.



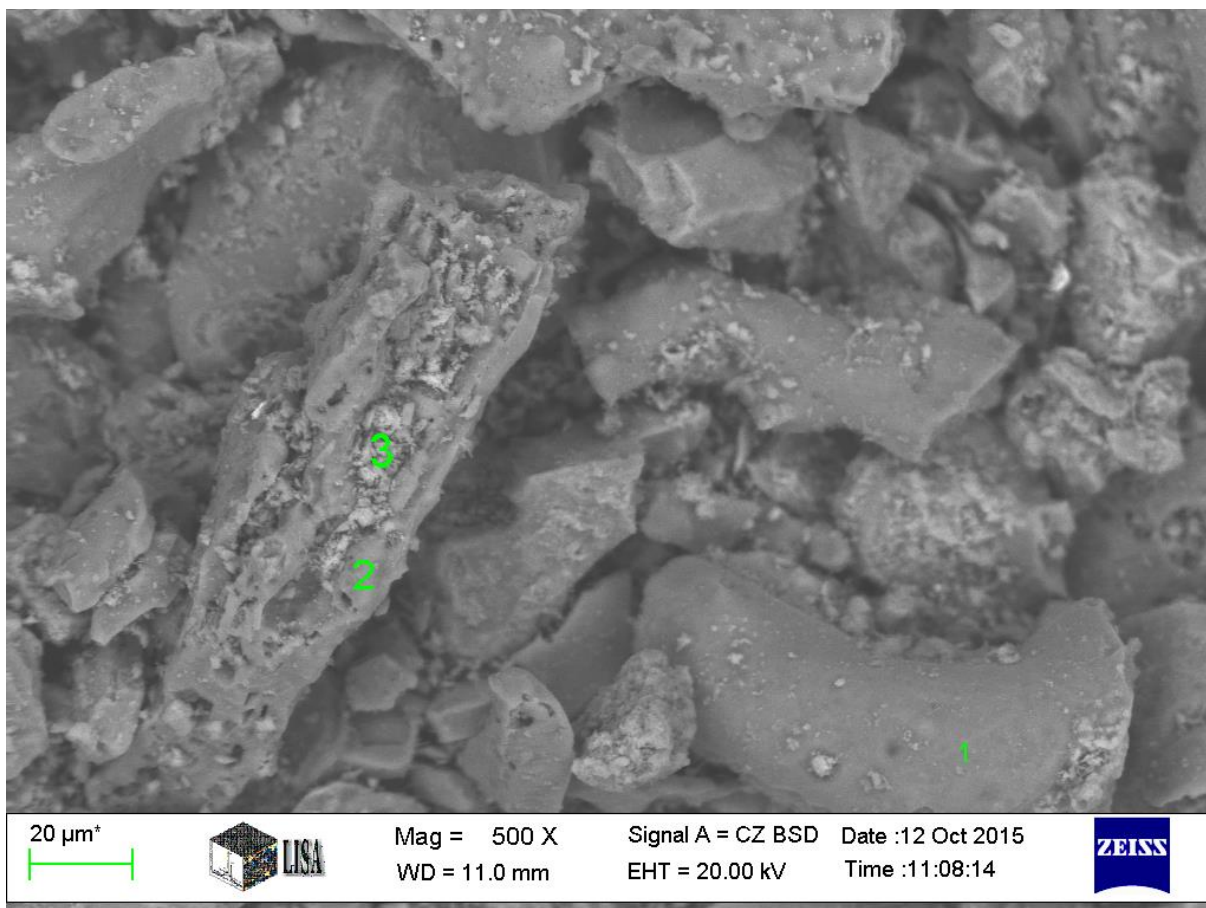
28. ábra: A búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele

F:\arpad\2015\szamosi zoltan-tuztan\20151012 hamu\buzaszalma.spc

Label A: buzaszalma



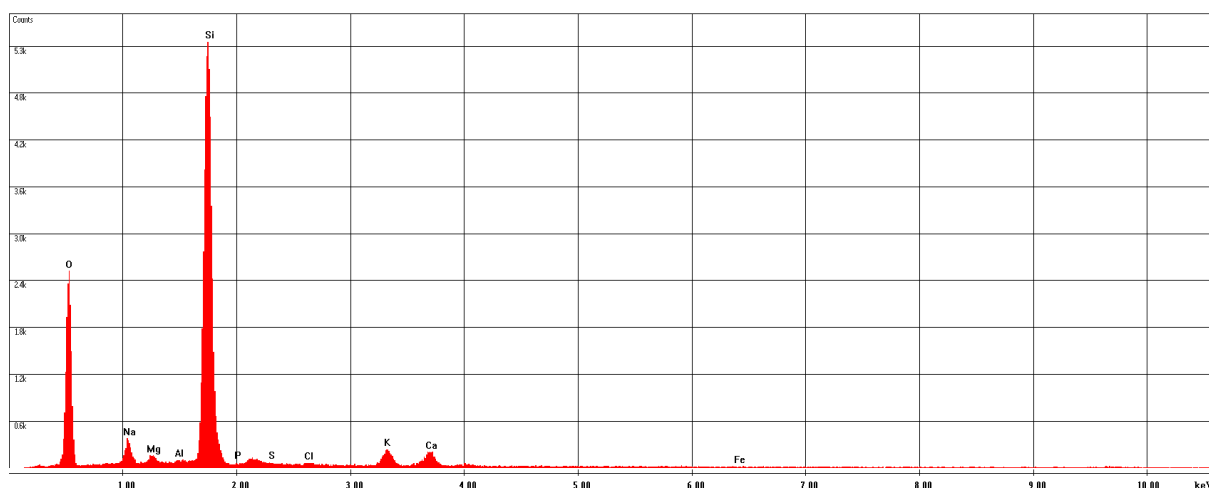
29. ábra: A búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvételéhez tartozó spektrum (Búzaszalma jelű felvétel)



30. ábra: A búzaszalma hamujának 500-szoros nagyítású felvétele

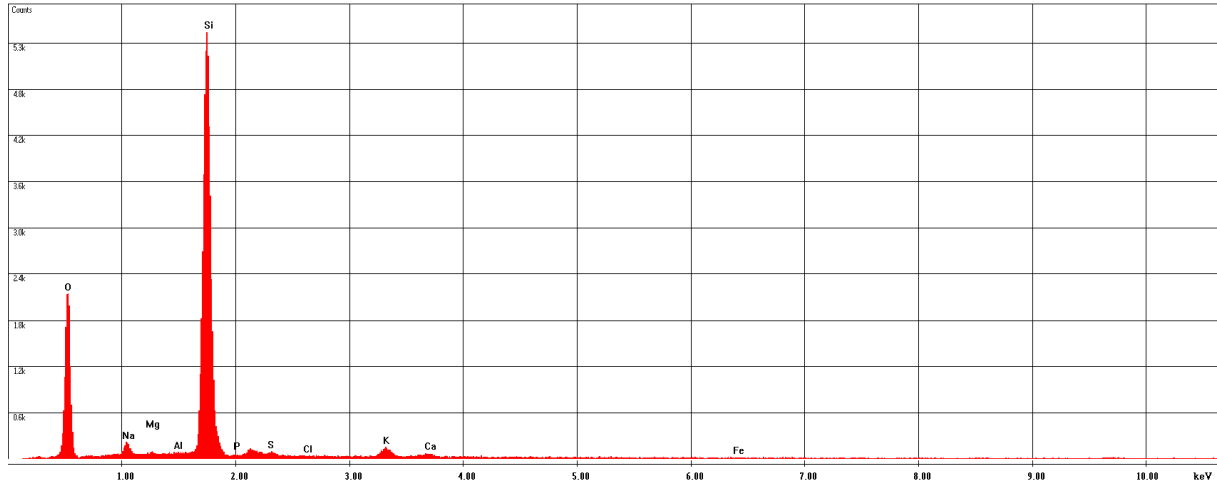
F:\jrpád\2015\szamosi zoltan- tuztan\20151012 hamu\buzaszalma 03 foto 1s pont.spc

Label A: buzaszalma 03 foto 1s pont



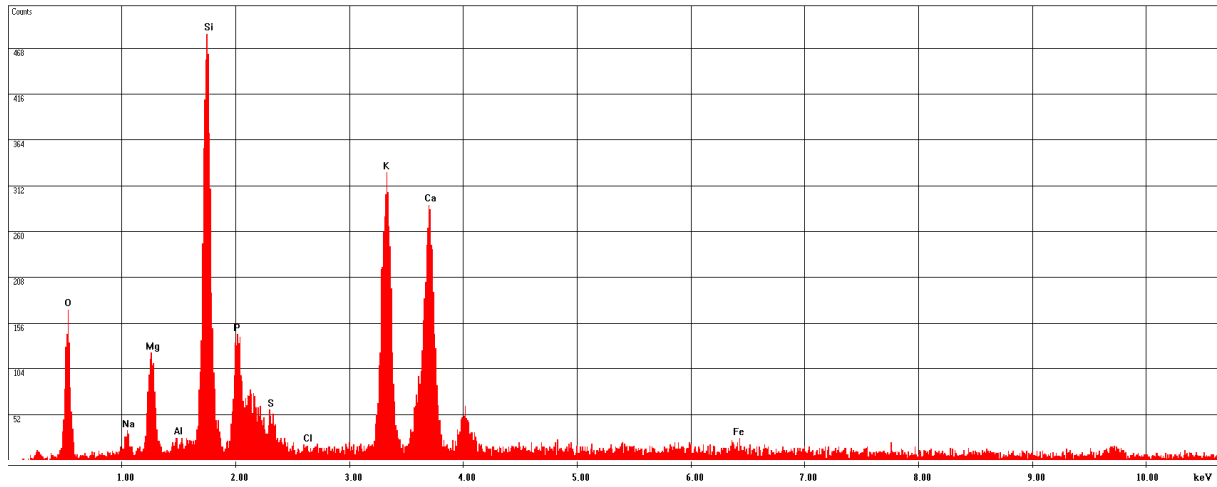
31. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvétel 1-es pontjának spektrum (Búzaszalma-3-1 jelű felvétel)

Label A: buzaszalma 03 foto 2s pont

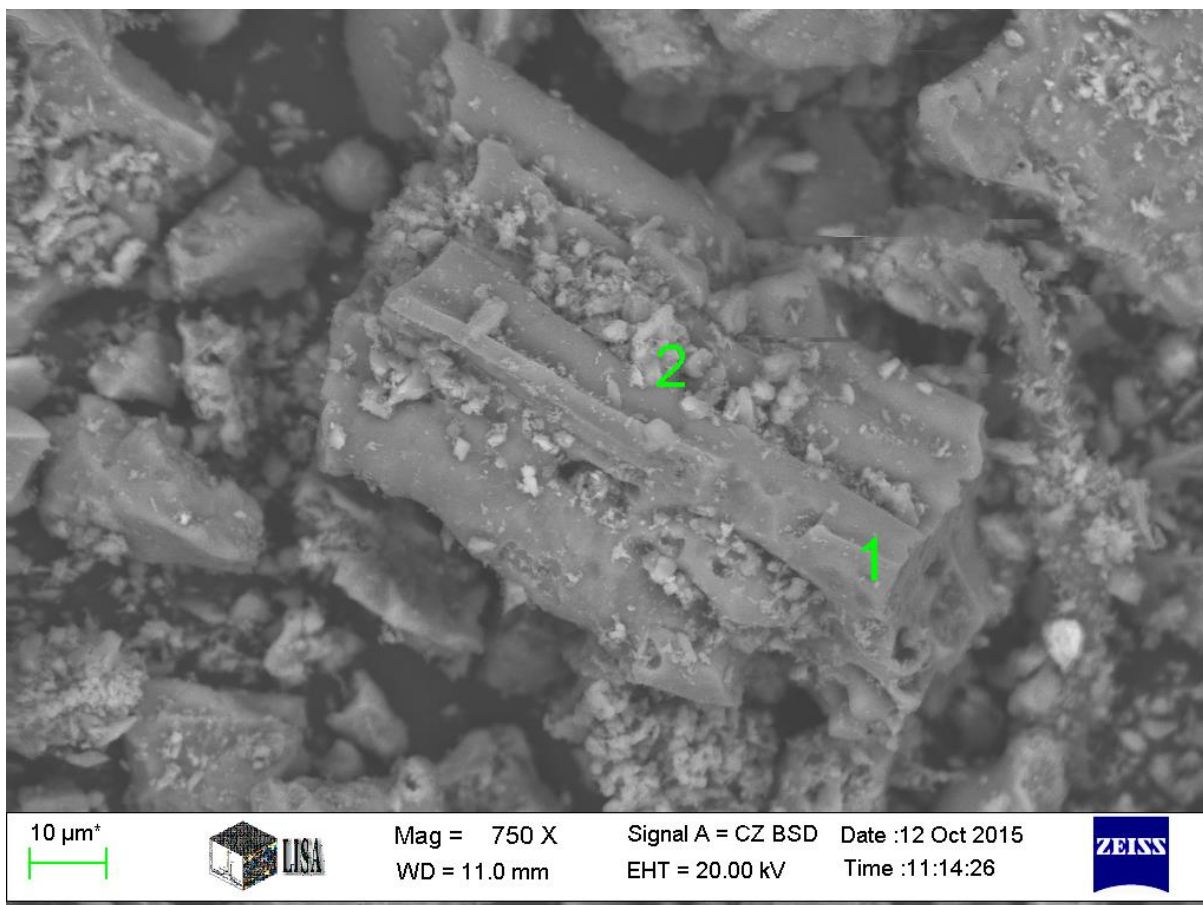


32. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvétel 2-es pontjának spektrum (Búzaszalma-3-2 jelű felvétel)

Label A: buzaszalma 03 foto 3s pont



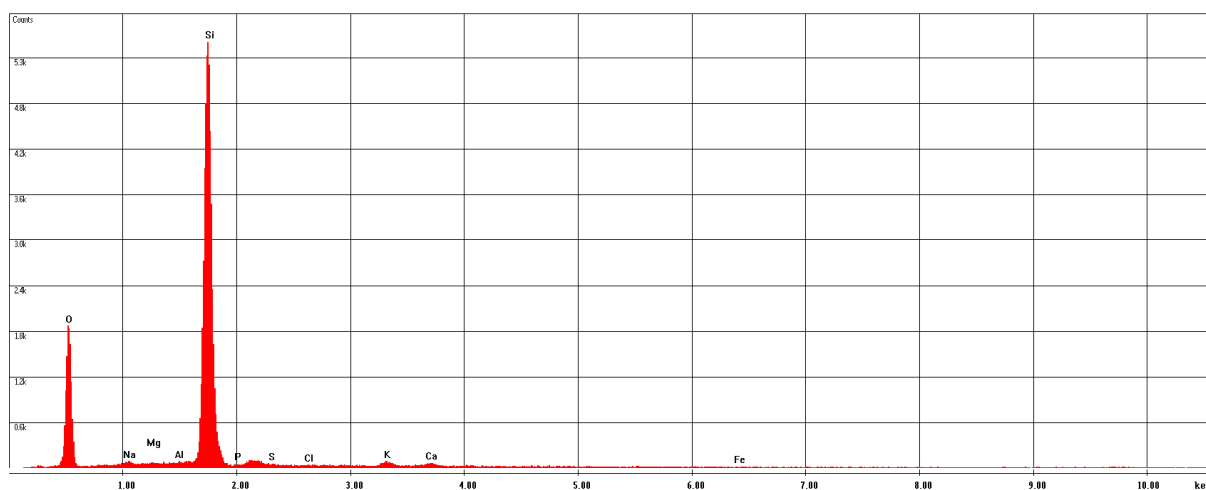
33. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvétel 3-as pontjának spektrum (Búzaszalma-3-3 jelű felvétel)



34. ábra: A búzaszalma hamujának 750-szeres nagyítású felvétele

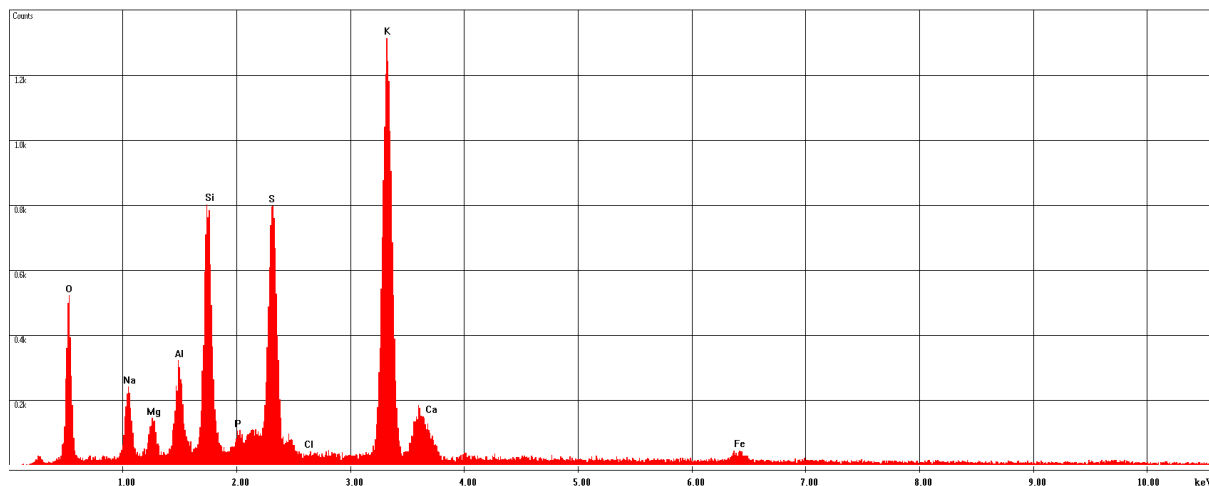
F:\rpad\2015\szamosi zoltan- tuztan\20151012 hamu\buzaszalma 05 foto 1s pont.spc

Label A: búzaszalma 05 foto 1s pont



35. ábra: A búzaszalma hamujának 750-szeres nagyítású felvételén látható 1-es pont spektruma (Búzaszalma-5-2 jelű felvétel)

Label A: buzaszalma 05 foto 2s pont

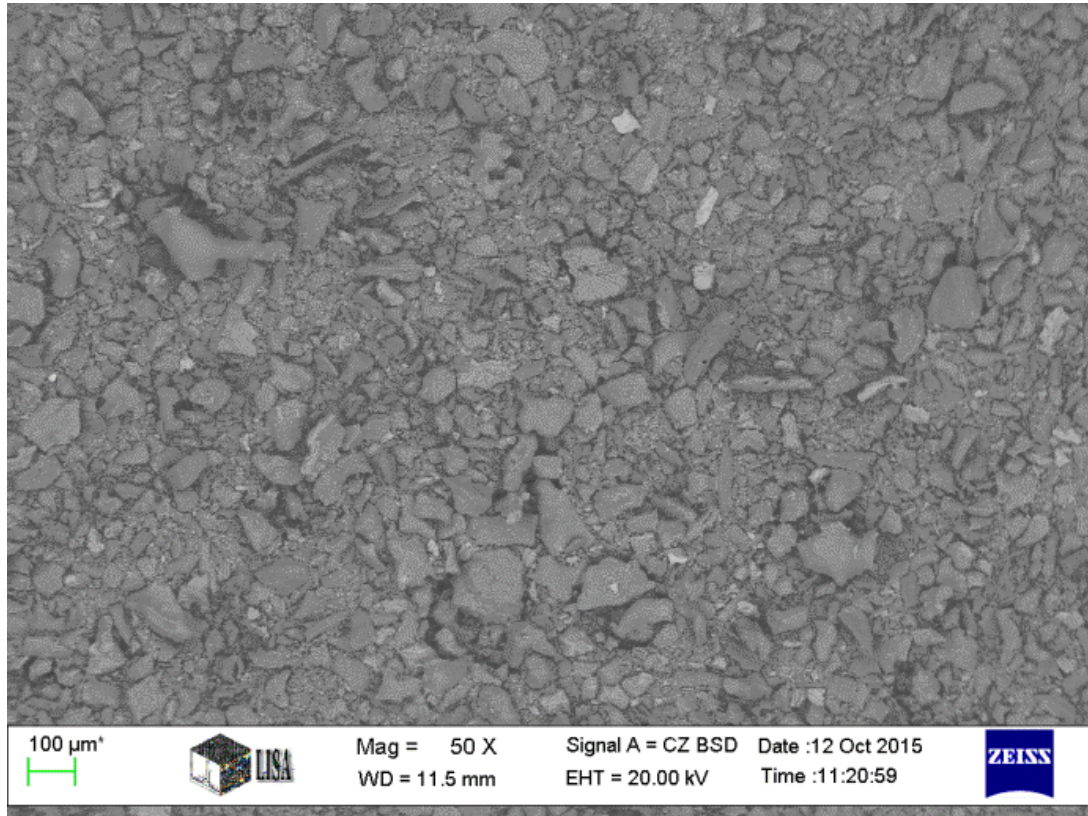


36. ábra: A búzaszalma hamujának 750-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Búzaszalma-6 jelű felvétel)

Jelölés	Na	Mg	Cl	K	Ca
	tartalom [m/m%]				
Búzaszalma	2,26	2,74	0	6,94	7
Búzaszalma-3-1	3,07	0,85	0,4	3,15	2,29
Búzaszalma-3-2	1,9	0,34	0,07	2,15	0,75
Búzaszalma-3-3	1,1	4,92	0,13	19,89	20,17
Búzaszalma-5-1	0,58	0,19	0,18	1,25	0,8
Búzaszalma-5-2	4,31	1,8	0	29,28	1,89
Búzaszalma-6	2,19	2,02	0	4,64	6,08
Átlag	2,20	1,84	0,11	9,61	5,57

20. Táblázat: A búzaszalma elektronmikroszkópos felvételek alapján felvett elemek tartalma

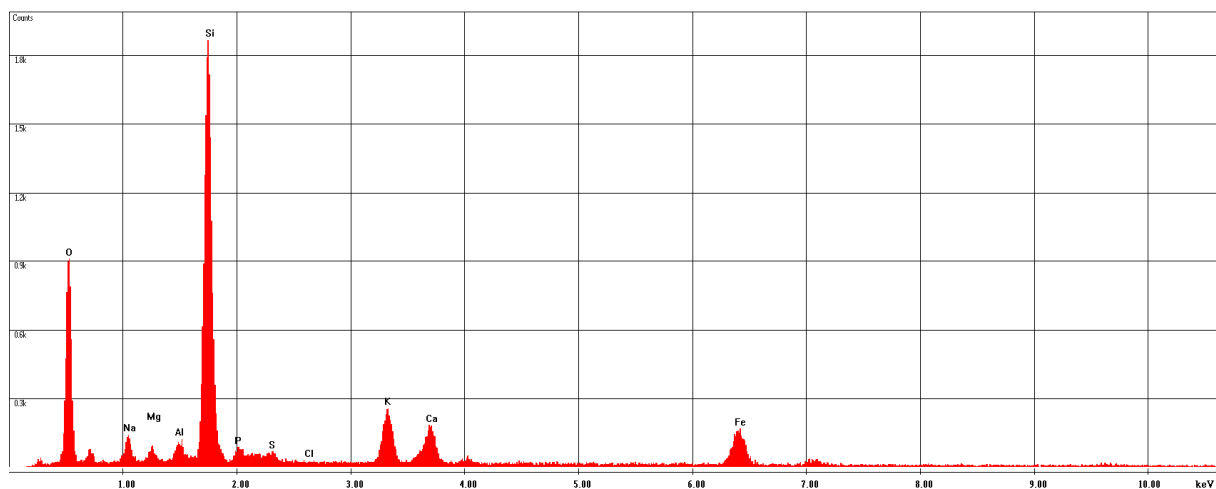
A hamu lágyulási pontjára az alkálifémek és alkáliföldfémek vannak hatással, a felvételek alapján láthatjuk, hogy a nátrium, a kálium és a kalcium is megtalálható a mintában. A következő ábrákon a pörkölt búzaszalma scanning felvételei láthatók és a hozzájuk tartozó spektrumok.



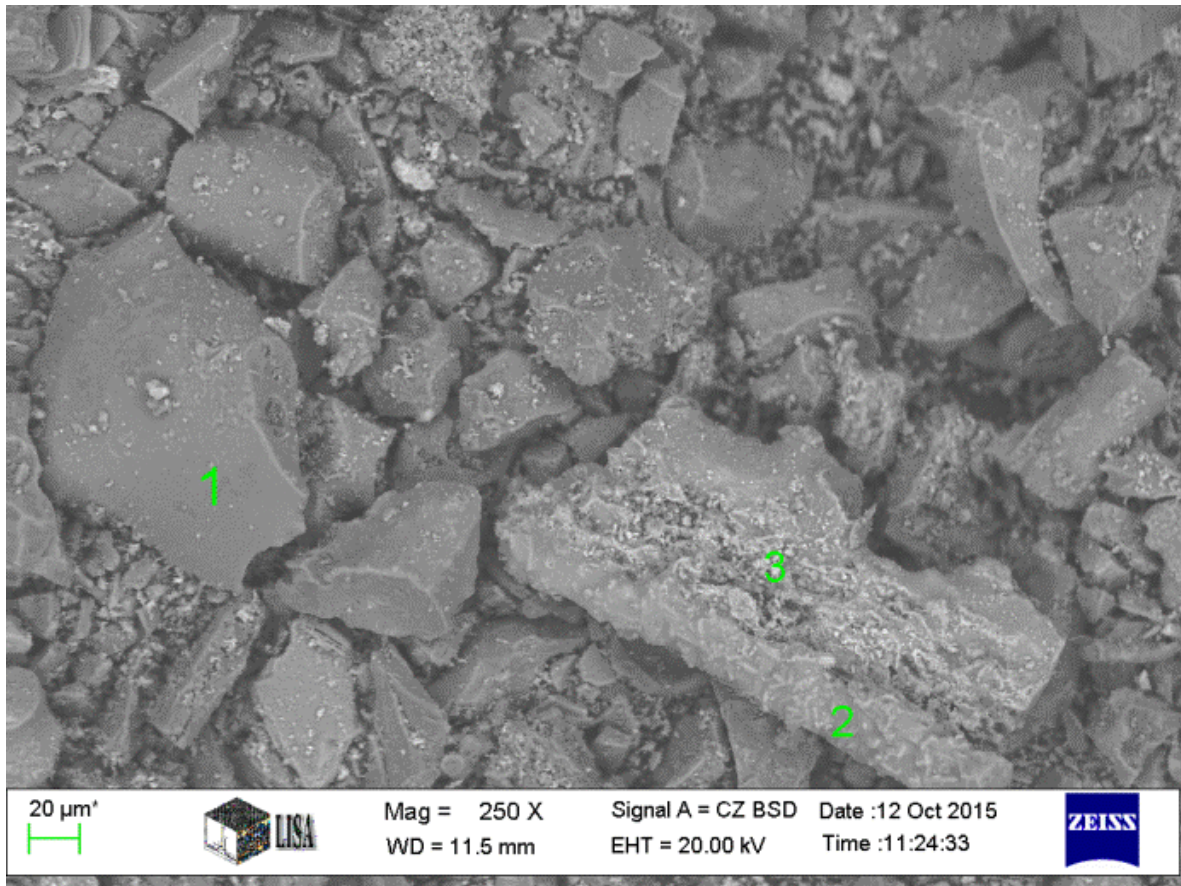
37. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele

F:\arpad\2015\szamosi zoltan- tuztan\20151012 hamu\buzaszalma B1.spc

Label A: buzaszalma B1



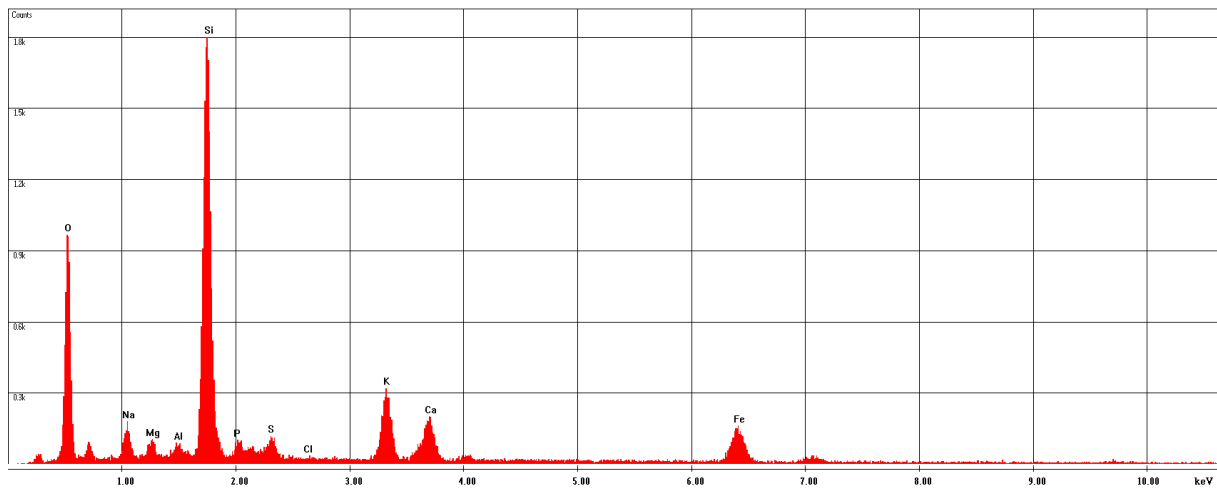
38. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvételéről vett átlag spektruma (Búzaszalma-B1 jelű felvétel)



39. ábra: A pörkölt búzaszalma 250-szeres nagyítású felvétele

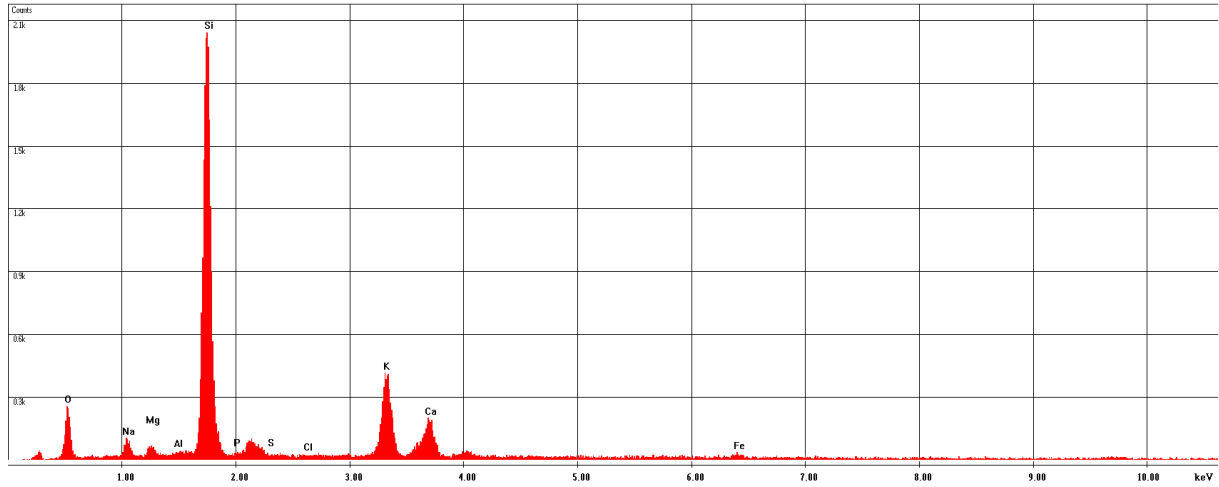
F:\arpad\2015\szamosi zoltan- tuztan\20151012 hamu\buzaszalma B1 02 foto atlag.spc

Label A: buzaszalma B1 02 foto atlag



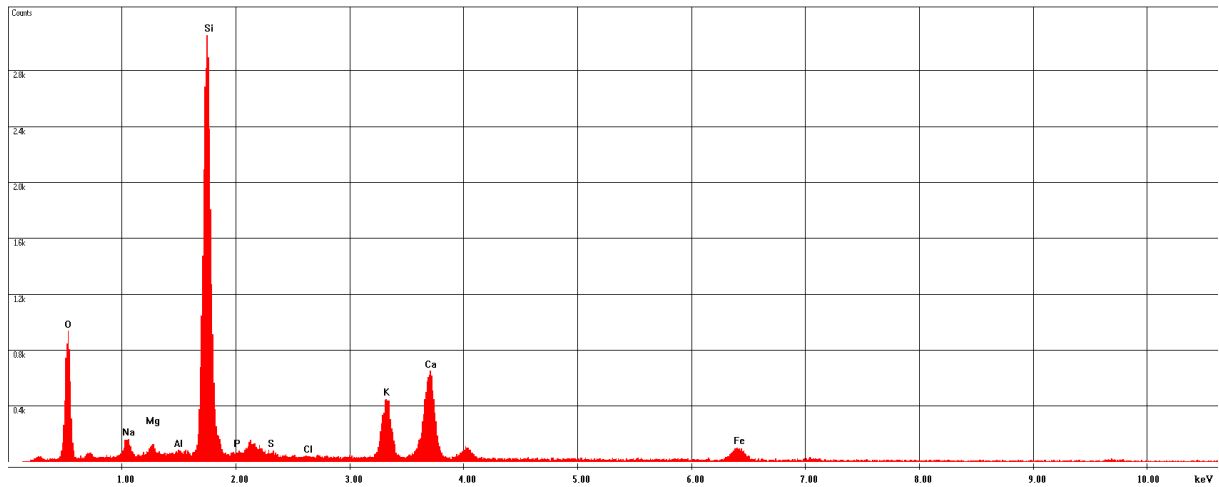
40. ábra: A pörkölt búzaszalma 250-szeres nagyítású felvételének átlagtartalom spektruma (Búzaszalma-B1-3-1 jelű felvétel)

Label A: buzaszalma B1 03 foto 1s pont



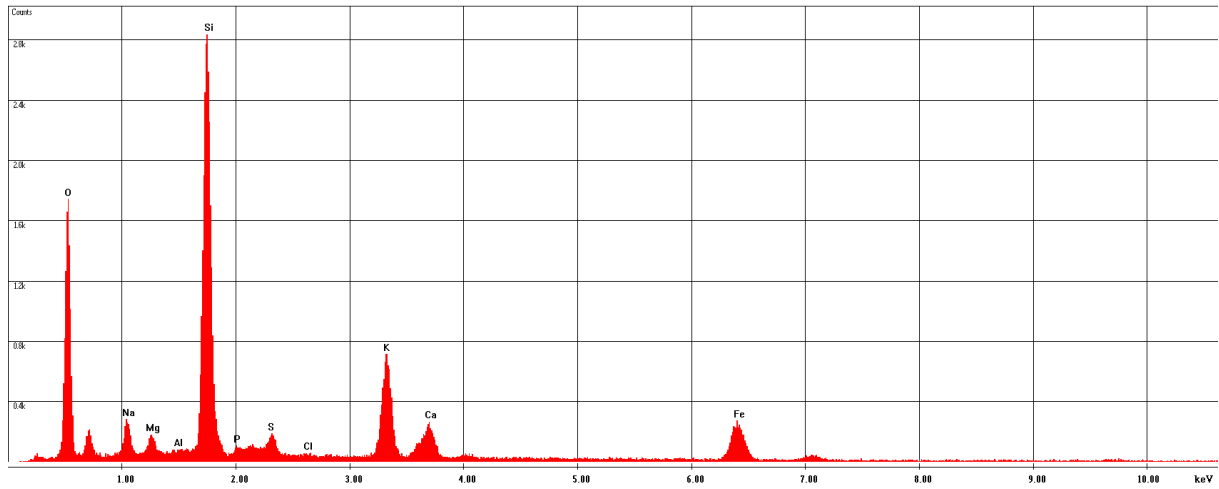
41. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 250-szeres nagyítású felvételén látható 1-es pont spektruma (Búzaszalma-B1-3-2 jelű felvétel)

Label A: buzaszalma B1 03 foto 2s pont

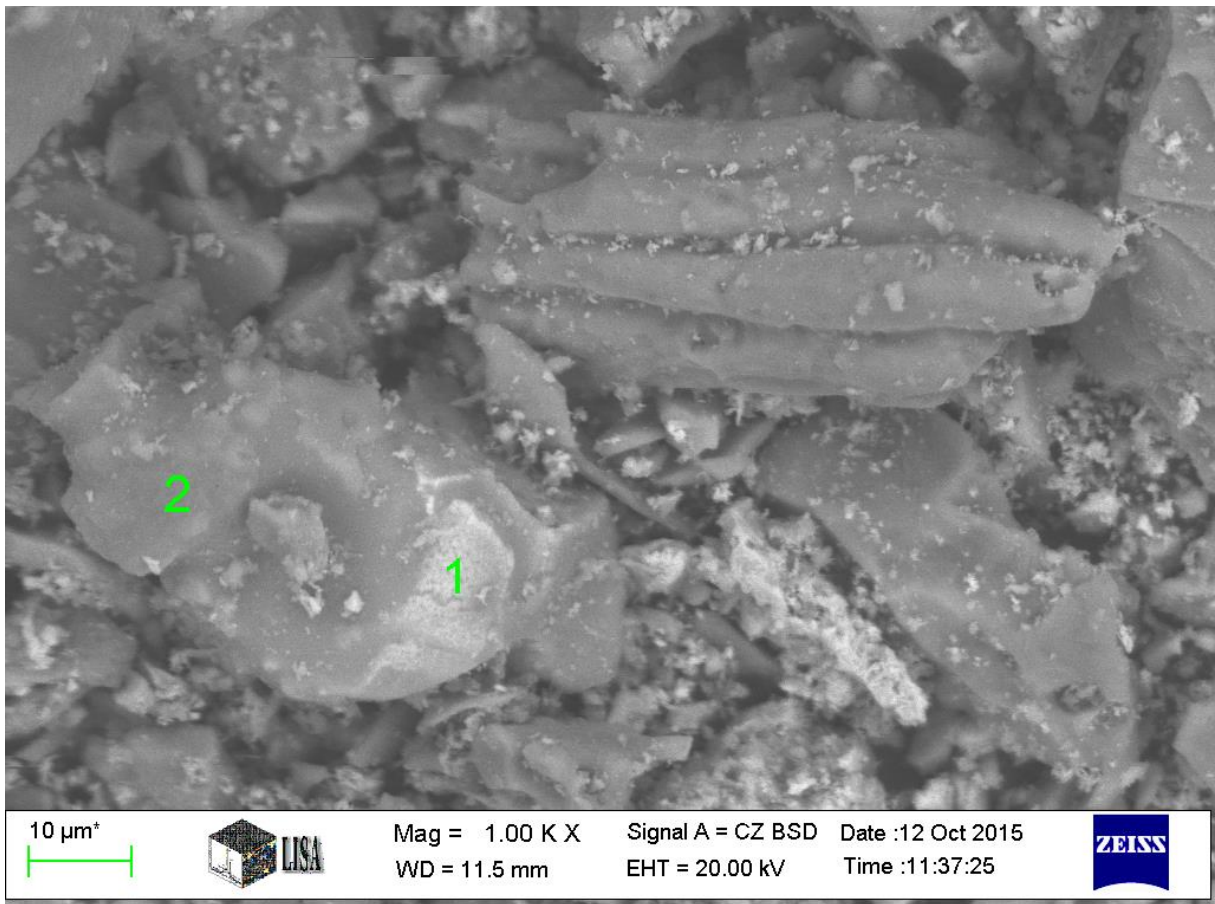


42. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 250-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Búzaszalma-B1-3-3 jelű felvétel)

Label A: buszasalma B1 03 foto 3s pont

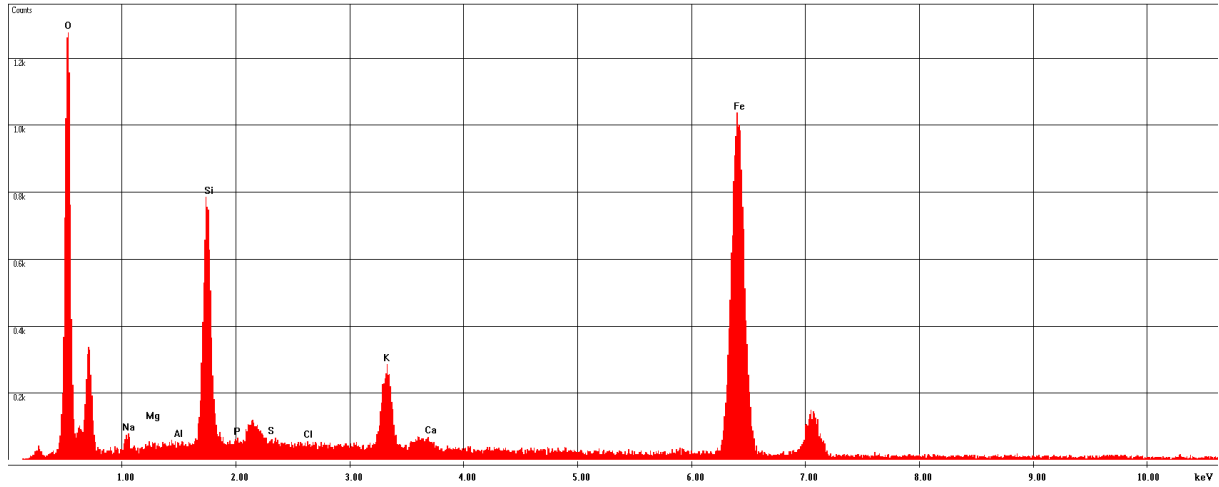


43. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 250-szeres nagyítású felvételén látható 3-as pont spektruma (Búzaszalma-B1-4 jelű felvétel)



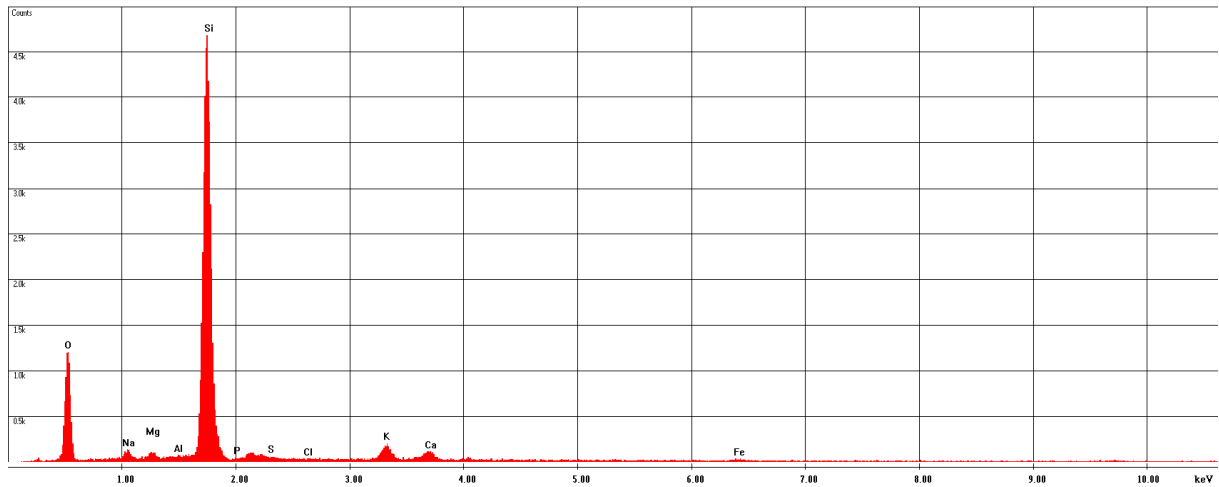
44. ábra: A pörkölt búzaszalma 1000-szeres nagyítású felvétele

Label A: buzaszalma B1 06 foto 1s pont



45. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 1000-szeres nagyítású felvételén látható 1-as pont spektruma (Búzaszalma-B1-6-1 jelű felvétel)

Label A: buzaszalma B1 06 foto 2s pont



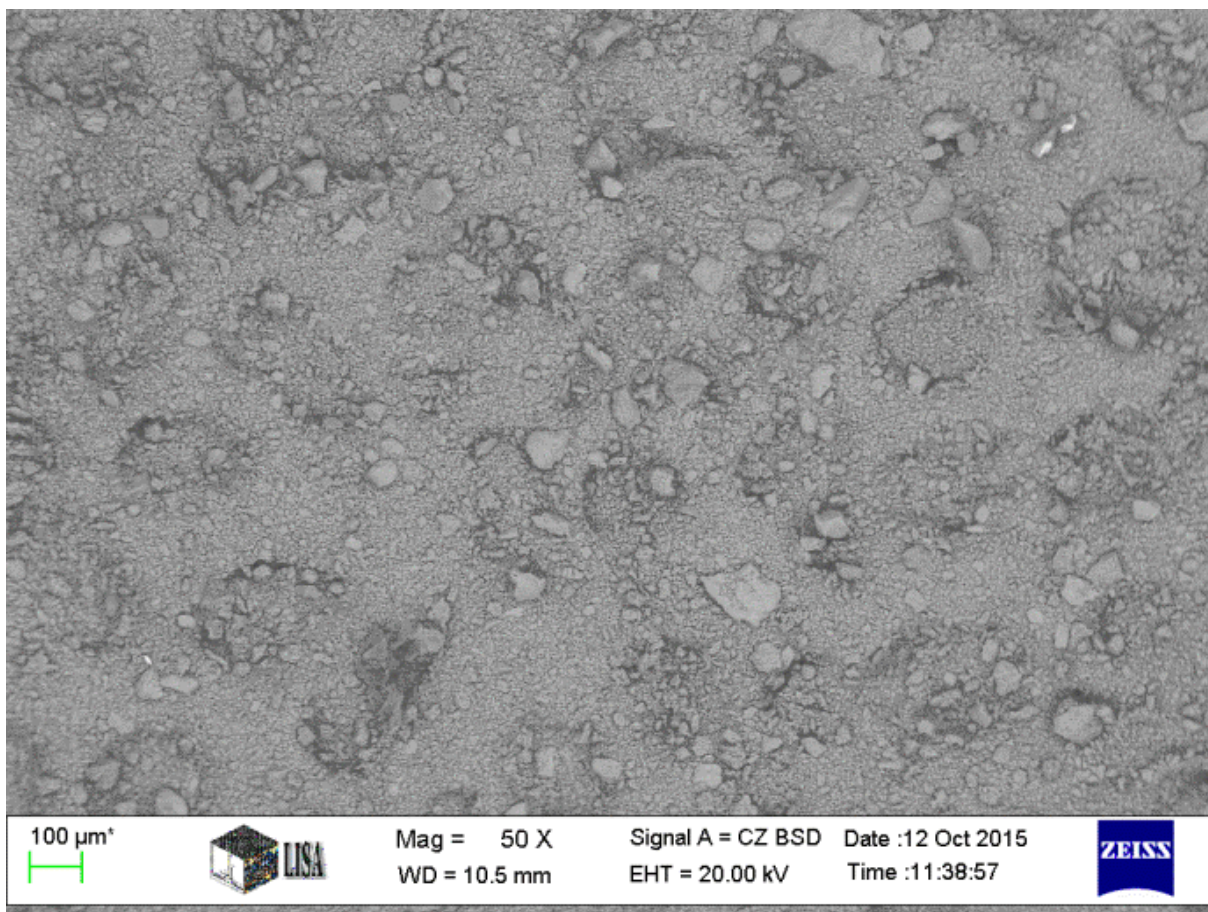
46. ábra: A pörkölt búzaszalma hamujának 1000-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Búzaszalma-B1-6-2 jelű felvétel)

Jelölés	Na	Mg	Cl	K	Ca
	tartalom [m/m%]				
Búzaszalma-B1	2,75	1,16	0,05	6,81	5
Búzaszalma-B1-2	3,18	1,33	0	9,95	5,16
Búzaszalma-B1-3-1	2,5	1,19	0	21,29	8,36
Búzaszalma-B1-3-2	2,1	0,97	0	9,73	14,16
Búzaszalma-B1-3-3	3,4	1,52	0,13	10,97	3,8
Búzaszalma-B1-4	3,23	0,89	0,07	7,58	5,75
Búzaszalma-B1-6-1	1,09	0,26	0,14	10,74	0,53
Búzaszalma-B1-6-2	1,34	0,73	0,22	3,7	2,36
Átlag	2,45	1,01	0,08	10,10	5,64

21. Táblázat: A pörkölt búzaszalma elektronmikroszkópos felvételek alapján felvett elemek tartalma

A két tüzelőanyag hamut illetve a tartalmakat összehasonlítva egyértelműen látszik a nátrium, kálium tartalom növekedése. Továbbá látszik a vas, mint alkotó dúsulása is, ez arra utal, hogy valamelyest korrodált acél kemencebetétben végeztem a kezelést. Az oxigén tartalom is nőtt, mert vasoxid darabok kerültek a mintára miközben a kemencebetétbe helyeztem. Érdekes eredmény lehet még, hogy a búzaszalmában nagyon magas a szilíciumtartalom [47], melynek jelenlétének magyarázata fejtörést okozott. Irodalmi adatokból megismerhető, hogy természetes módon található meg a búzaszalmában, létezik olyan PhD kutatás, mely arról szól, hogyan lehet a szilíciumot kinyerni, illetve a kutatás szerzője úgy tekint a búzaszalmára, mint lehetséges szilíciumforrásra [48].

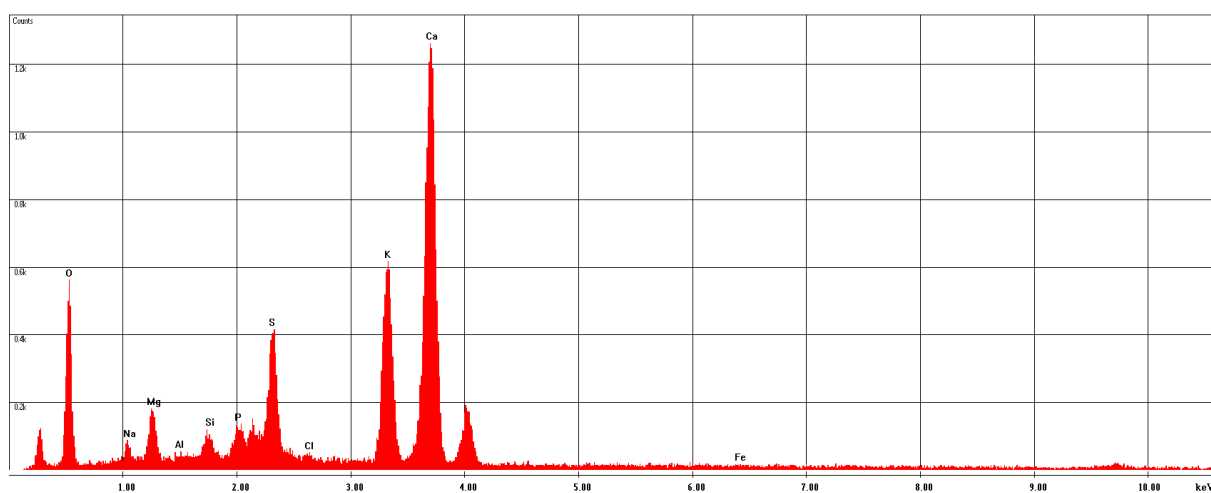
A következőkben szeretném bemutatni a repceszalma és a pörkölt repceszalma elektronmikroszkópos felvételeit és a hozzátartozó spektrumokat, illetve ezek alapján felvett tartalmakat összesített táblázatát.



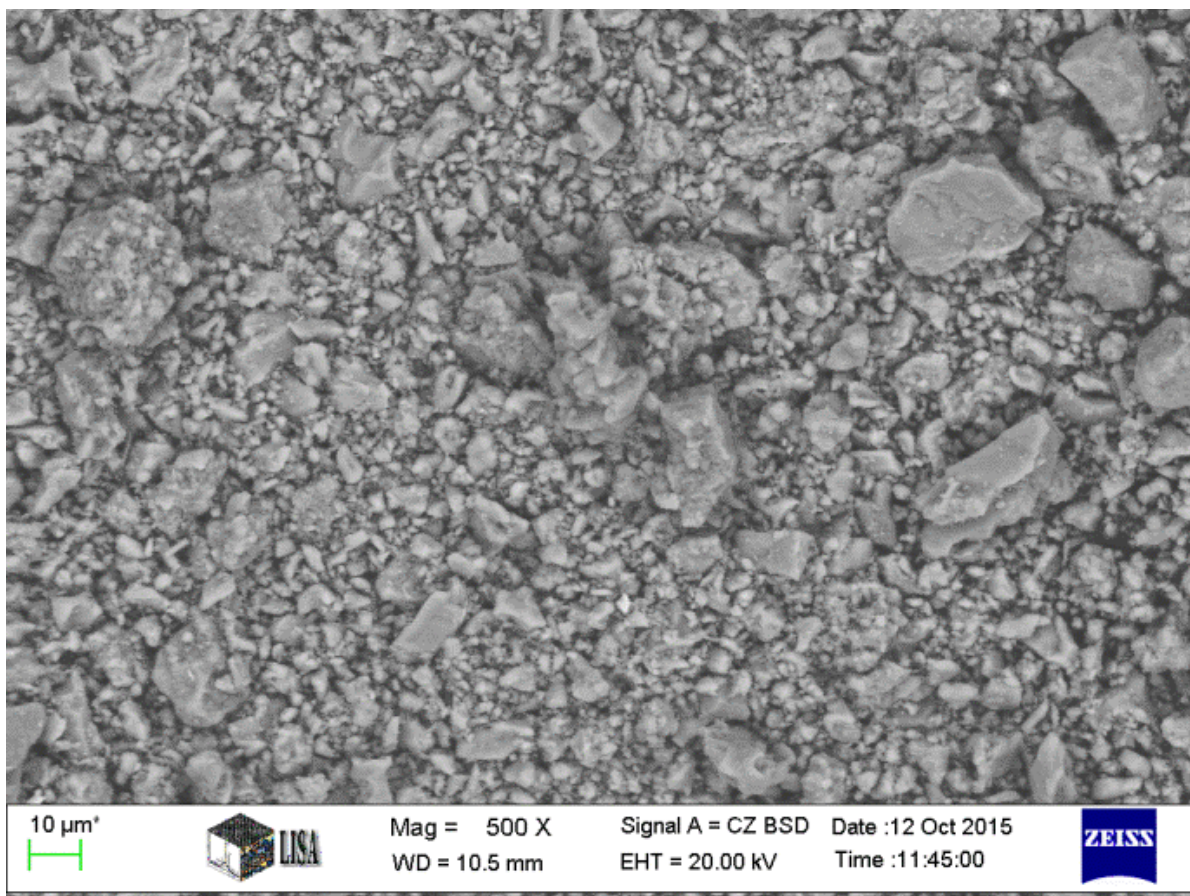
47. ábra: A repceszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele

F:\arpad\2015\szamosi zeltan-tuztan\20151012 hamurepce.spc

Label A: repce



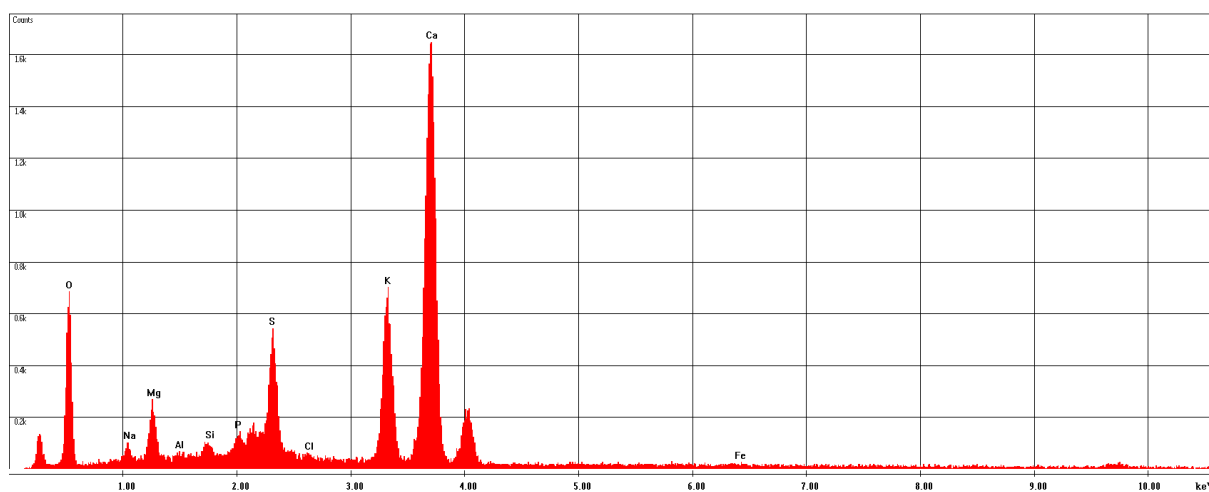
48. ábra: Az 50-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma jelű felvételt)



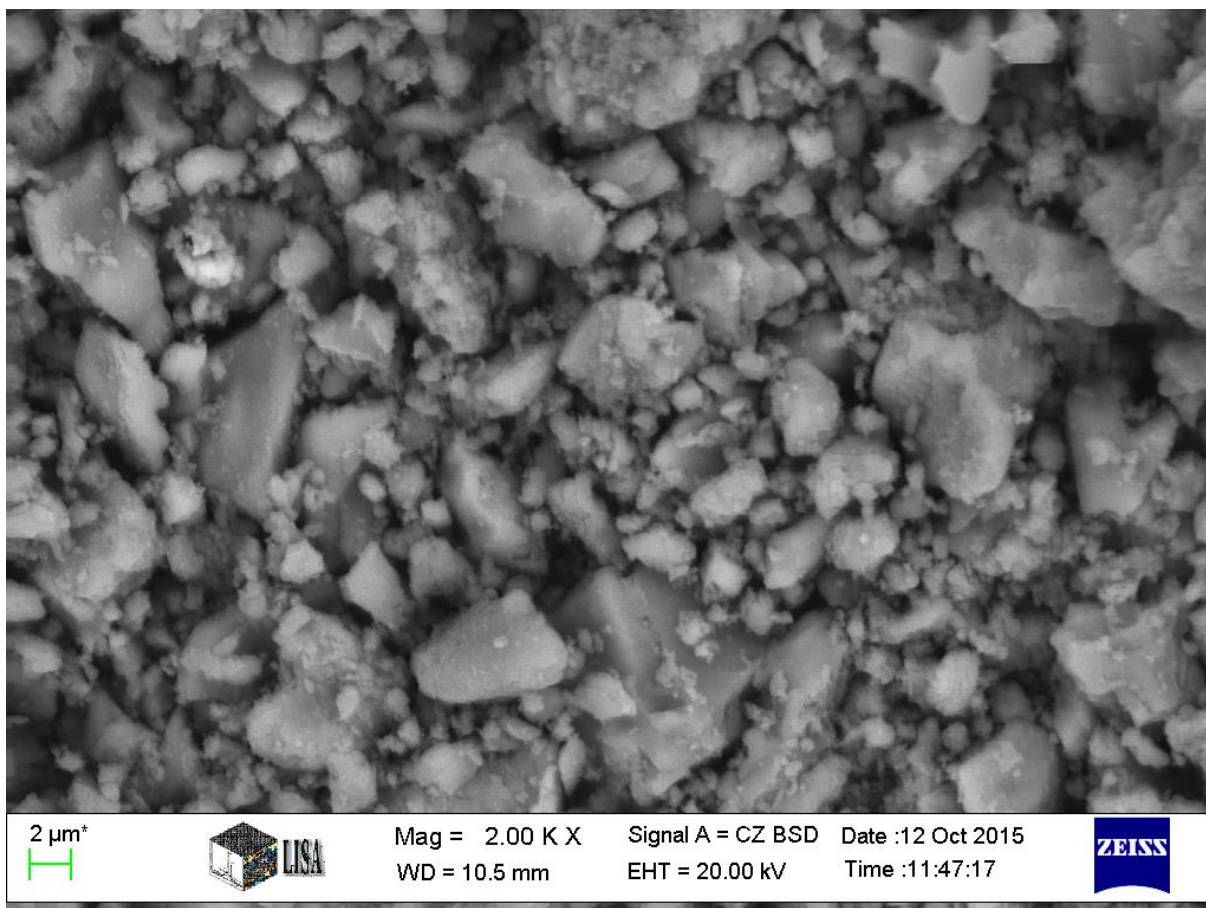
49. ábra: A repceszalma hamujának 500-szoros nagyítású felvétele

F:\arpad\2015\szamosi zollan-tuztan\20151012 hamurepce 02 foto atlag.spc

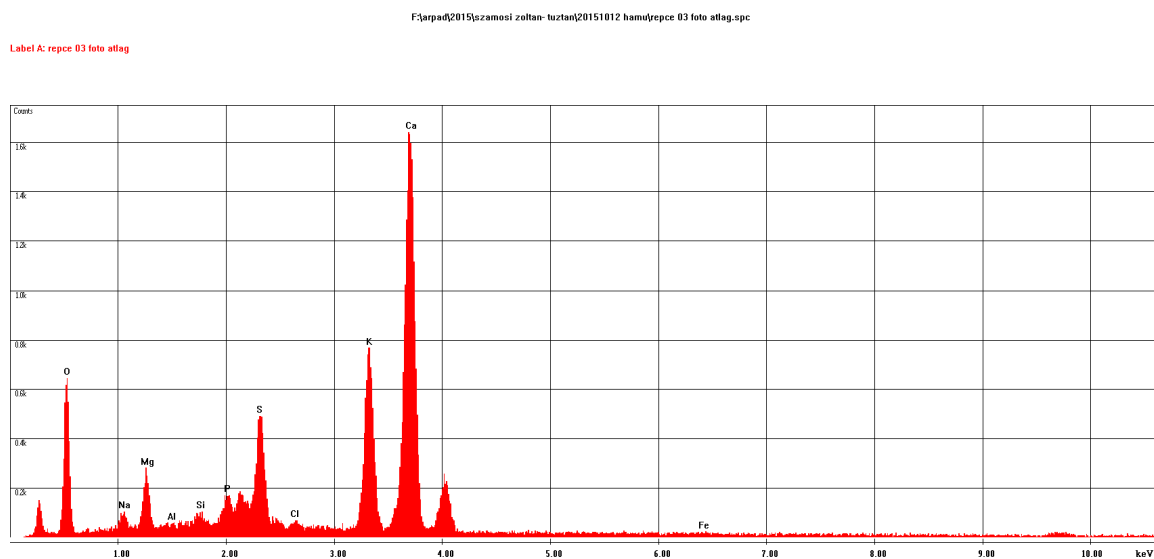
Label A: repce 02 foto atlag



50. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-2 jelű felvétel)



51. ábra: A repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvétele



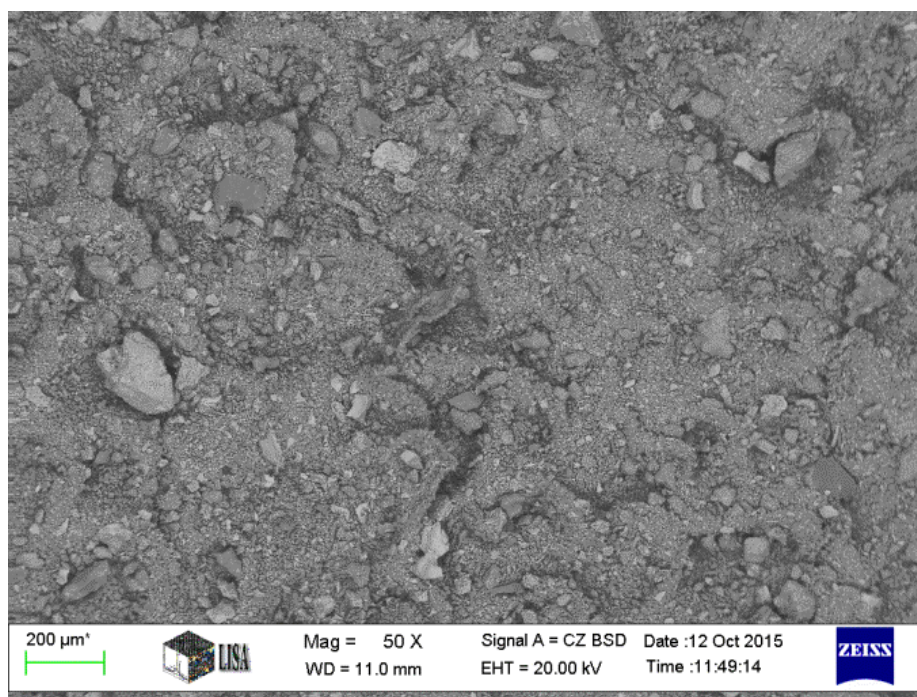
52. ábra: A 2000-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-3 jelű felvétel)

Ebben a mintában is megfigyelhető az alkálifémek és alkáliföldfémek jelenléte, a felvétel alapján láthatjuk, hogy a nátriumból, a káliumból és a kalciumból is jelentős mennyiség található meg a mintában. Továbbá alumínium, foszfor és jelentős kén is megtalálható a

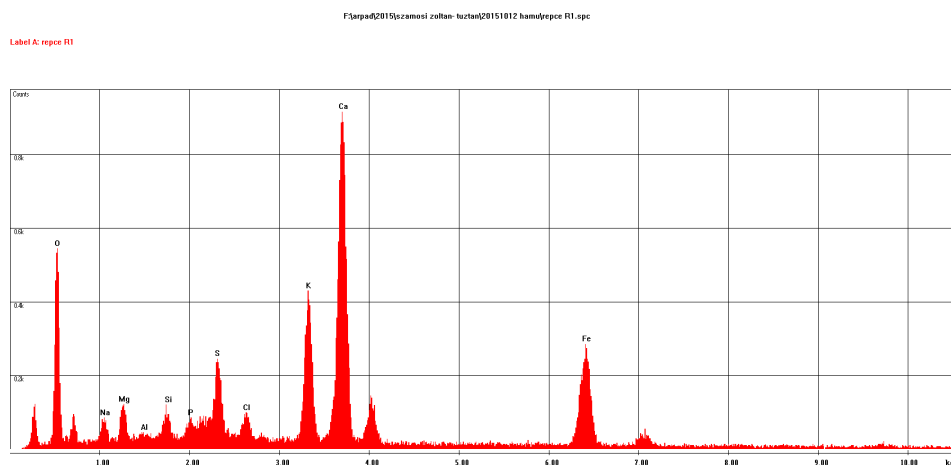
hamuban. A 75.-78. ábrán a pörkölt repceszalma hamujának fényképei láthatók a hozzá-tartozó spektrumokkal együtt.

Jelölés	Na	Mg	Cl	K	Ca
	tartalom [m/m%]				
Repceszalma	1,79	3,27	0,74	9,94	33,74
Repceszalma-2	1,72	3,51	0,77	11,92	35,82
Repceszalma-3	1,37	3,32	0,63	8,63	36,38
Átlag	1,63	3,37	0,71	10,16	35,31

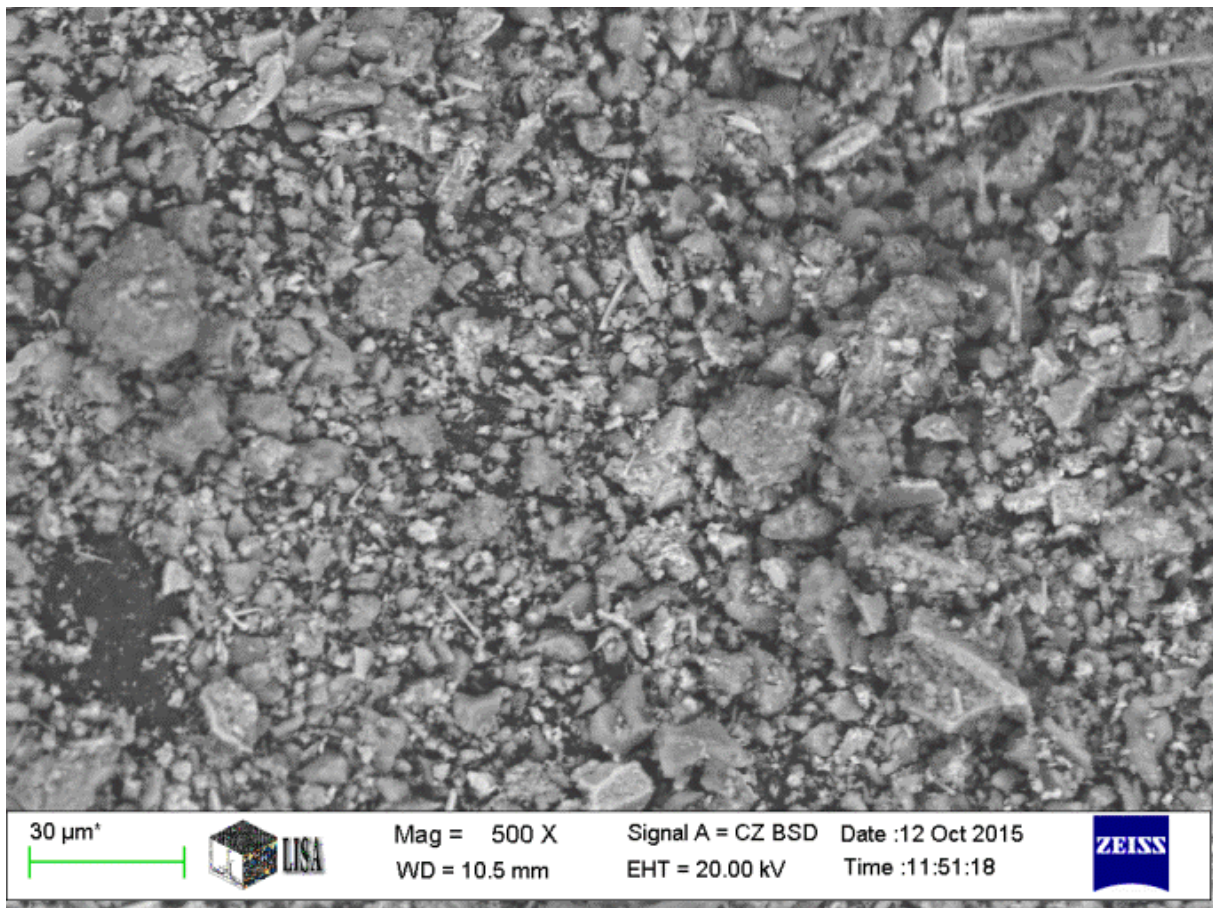
22. Táblázat: A repceszalma elektronmikroszkópos felvételek alapján felvett elemek tartalma



53. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 50-szeres nagyítású felvétele



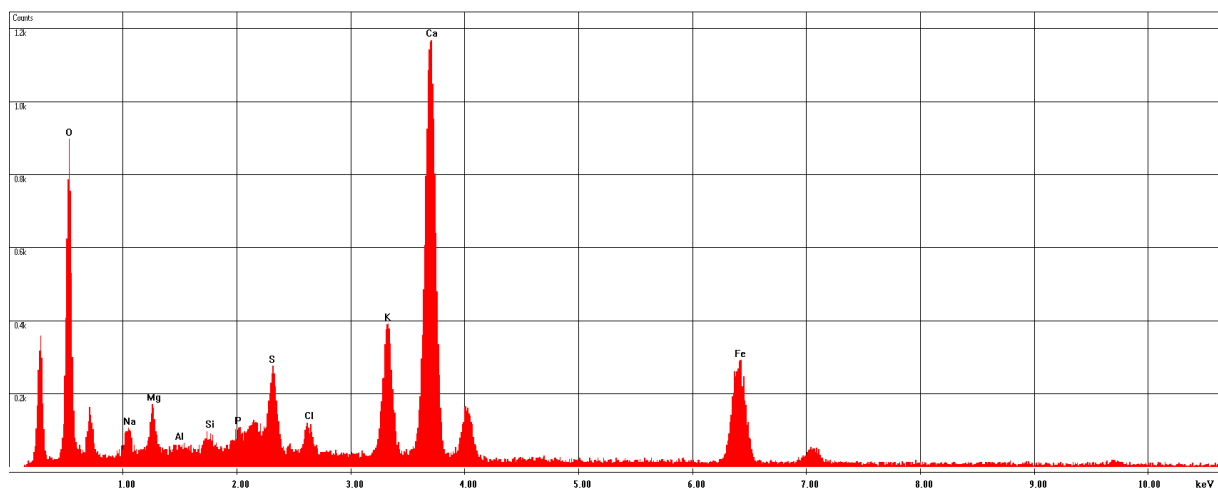
54. ábra: Az 50-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-R1 jelű felvétel)



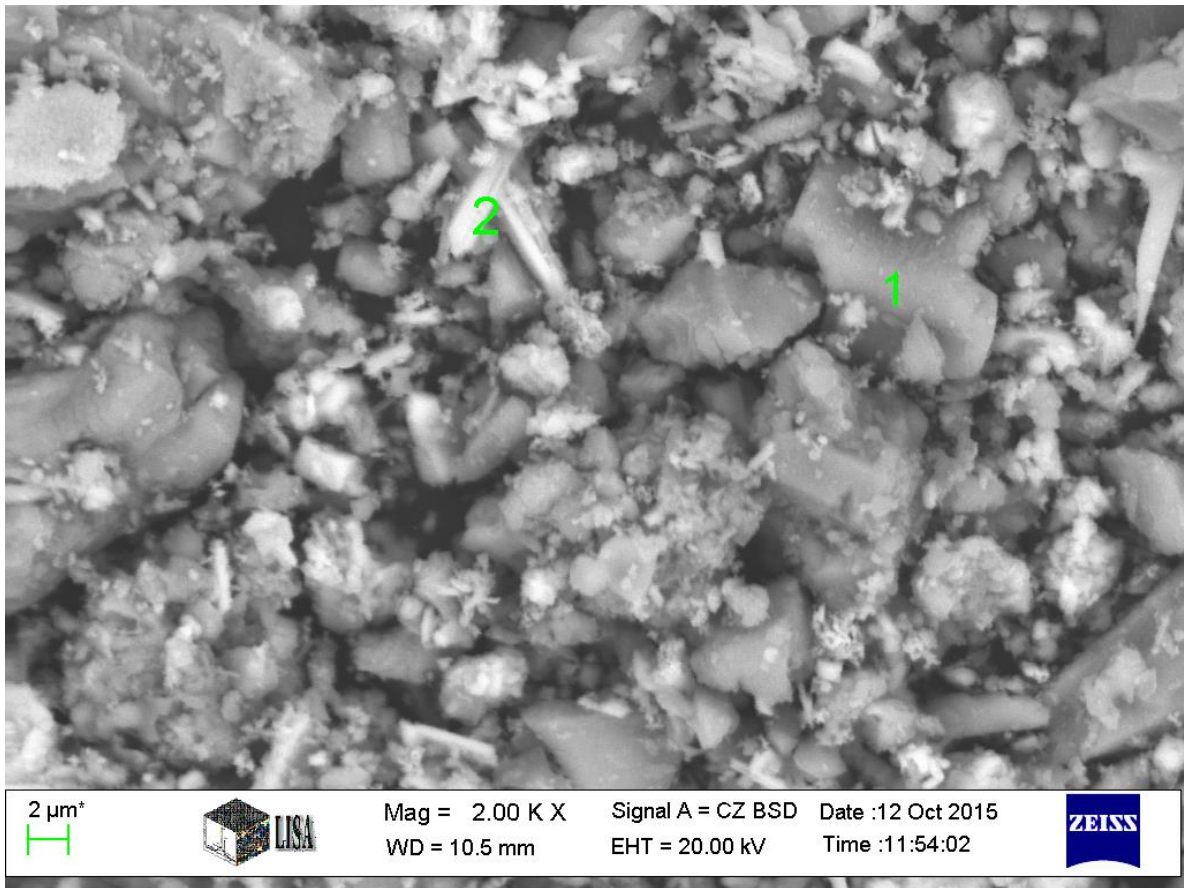
55. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 500-szoros nagyítású felvétele

F:\arpad\2015\szamosi zoltan- tuztan\20151012 hamurepce R1 02 foto atlag.spc

Label A: repce R1 02 foto atlag



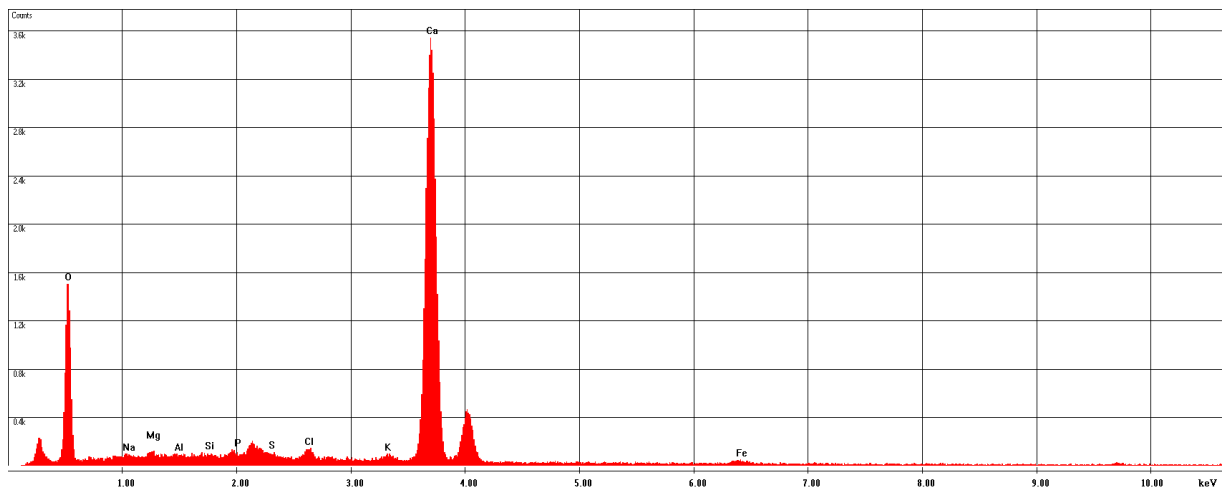
56. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Repceszalma-R1-3 jelű felvétel)



57. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvétele

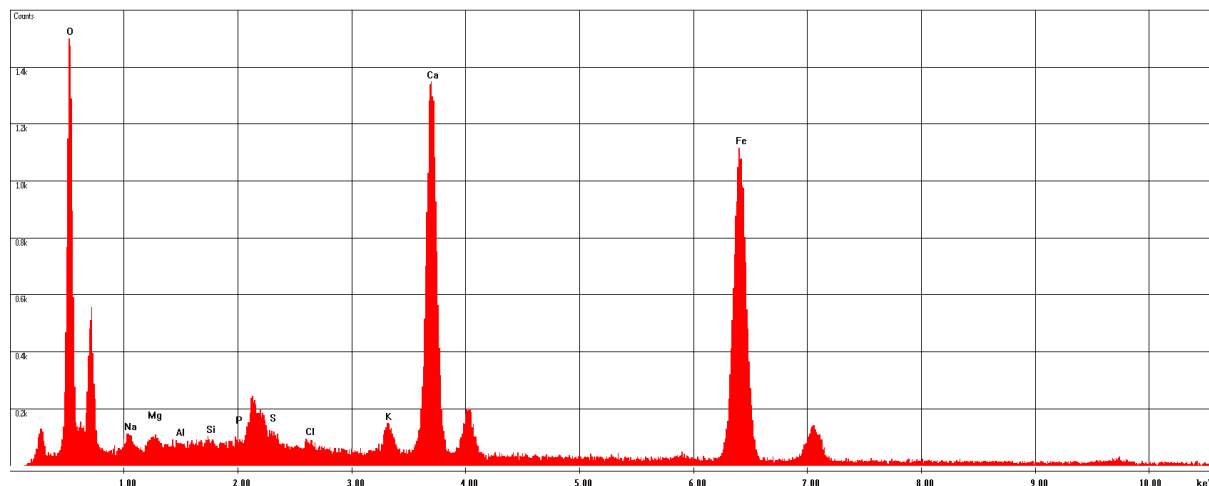
F:\arpad\2015\szamosi zoltan-tuztan\20151012 hamurepce R1 03 foto 1s pont.spc

Label A: repce R1 03 foto 1s pont



58. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvételén látható 1-es pont spektruma (Repceszalma-R1-3-1 jelű felvétel)

Label A: repce R1 03 foto 2s pont

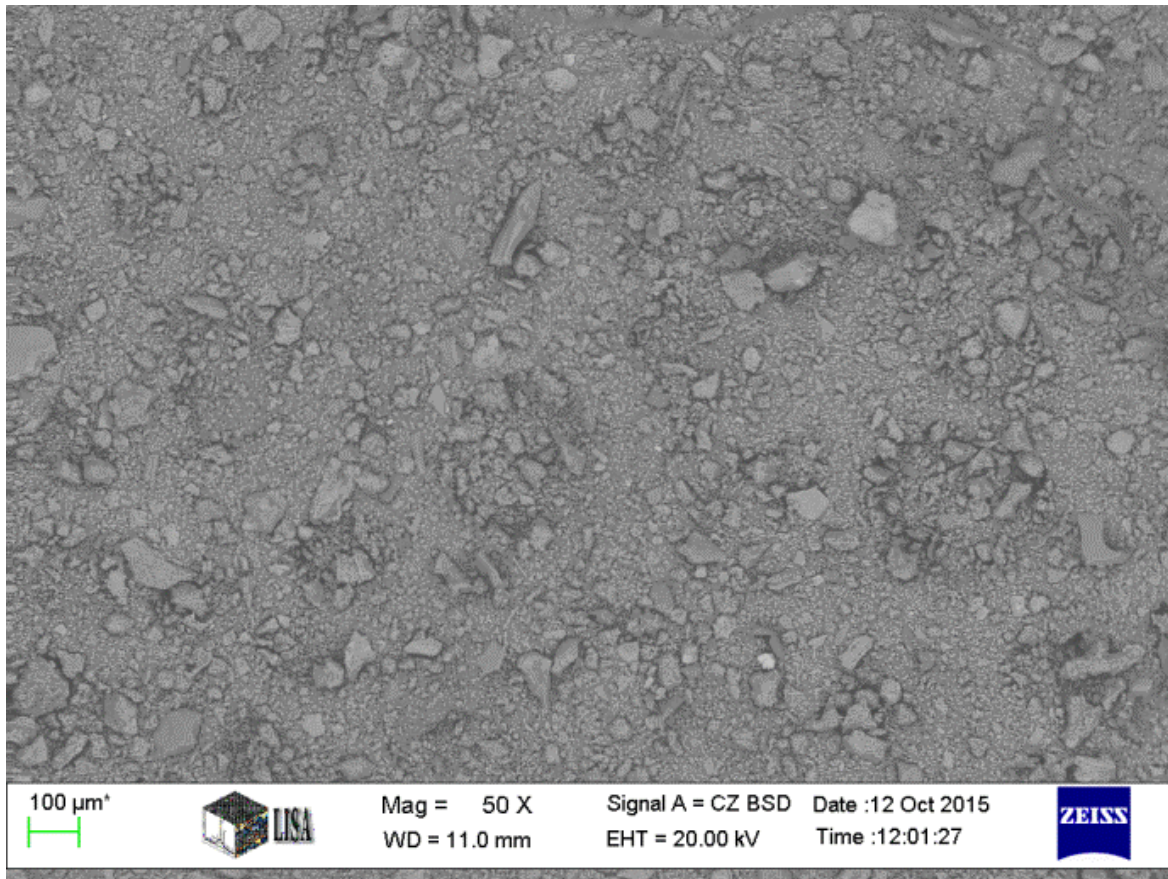


59. ábra: A pörkölt repceszalma hamujának 2000-szeres nagyítású felvételén látható 2-es pont spektruma (Repceszalma-R1-3-2 jelű felvétel)

A pörkölt repceszalma mintájában is megfigyelhető az alkálifémek és alkáliföldfémek jelenléte, a felvétel alapján láthatjuk, hogy a kalciumból (vagy oxidjából) jelentős mennyiség található meg a mintában. Továbbá klór, alumínium, foszfor és jelentős kén is megtalálható a hamuban. A pörkölés hatására a kálium tartalom csökkenése, míg a klór dúsulása tapasztalható.

Jelölés	Na	Mg	Cl	K	Ca
	tartalom [m/m%]				
Repceszalma-R1	1,91	2,34	1,51	14,87	25,84
Repceszalma-R1-2	2,02	2,09	1,26	10,22	26,95
Repceszalma-R1-3	1,92	2,08	0,83	18,44	25,34
Repceszalma-R1-3-1	0,58	0,67	0,82	0,59	46,65
Repceszalma-R1-3-2	1,28	0,84	0,3	7,34	19,26
Átlag	1,54	1,60	0,94	10,29	28,81

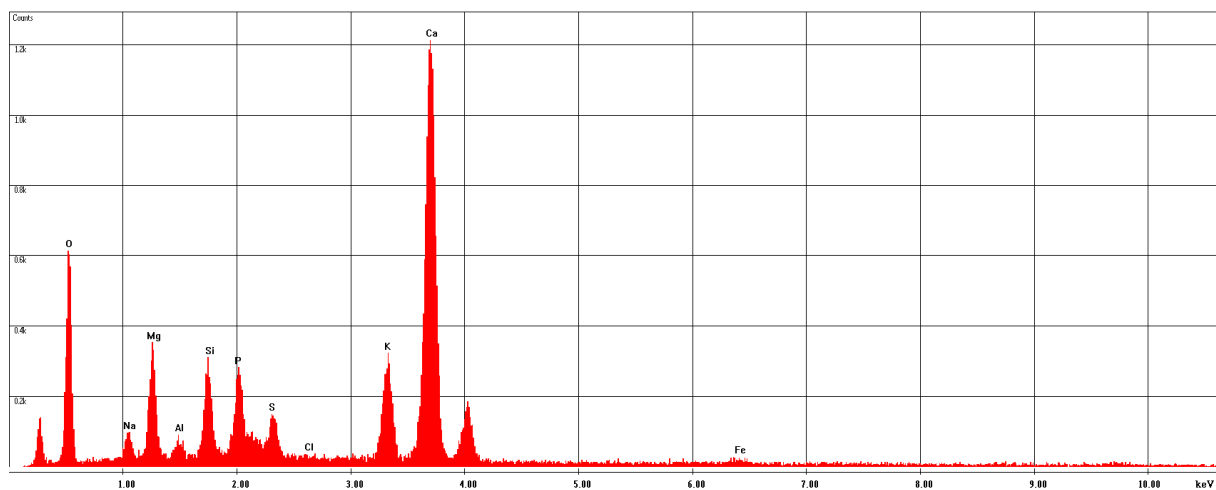
23. Táblázat: A pörkölt repceszalma elektronmikroszkópos felvételek alapján felvett elemek tartalma



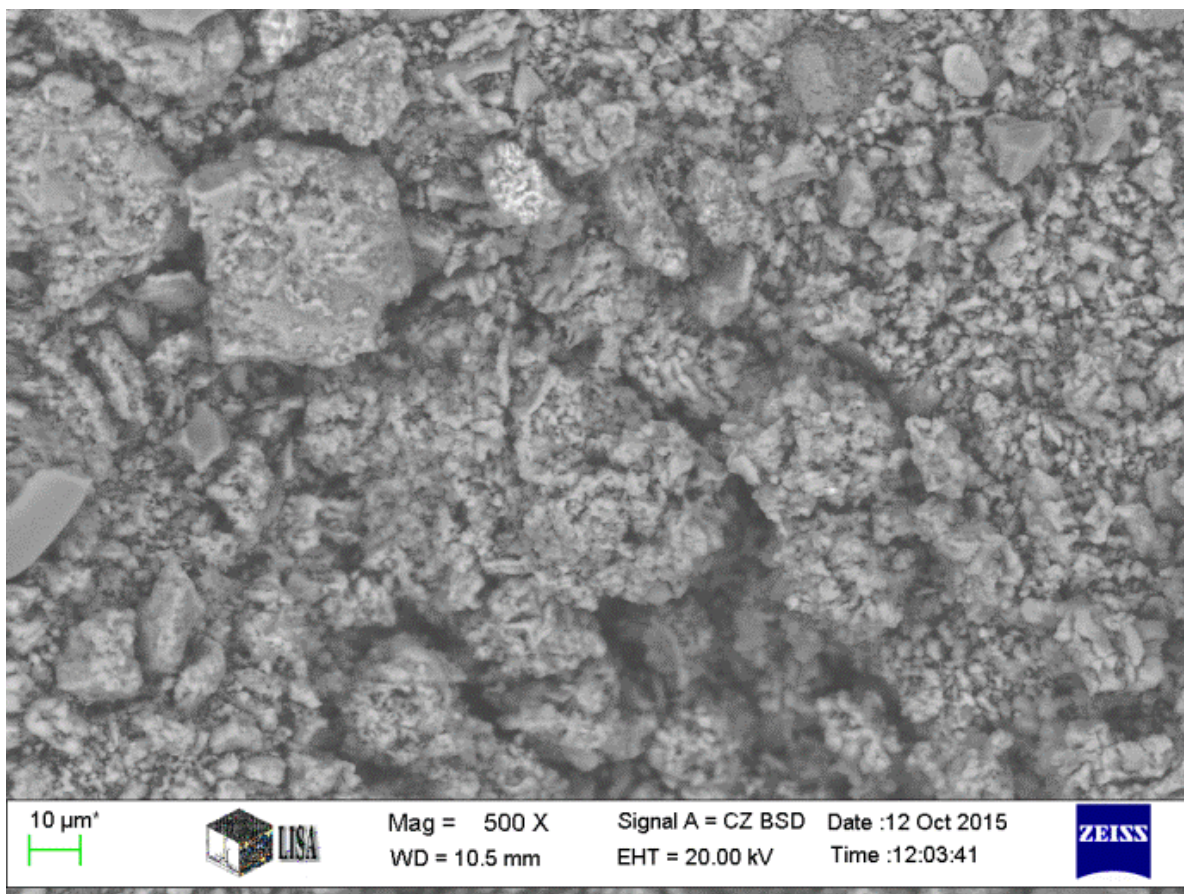
60. ábra: A szőlővenyige hamujának 50-szeres nagyítású felvétele

F:\arpad\2015\szamosi zoltan-tuztan\20151012 hamulyenyige.spc

Label A: venyige



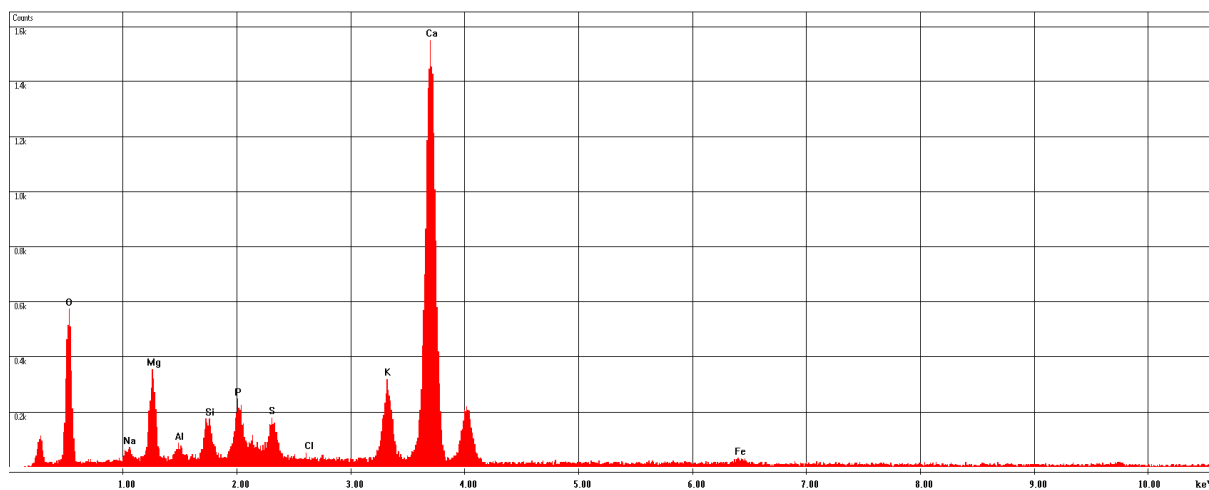
61. ábra: A szőlővenyige hamujának 50-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige jelű felvétel)



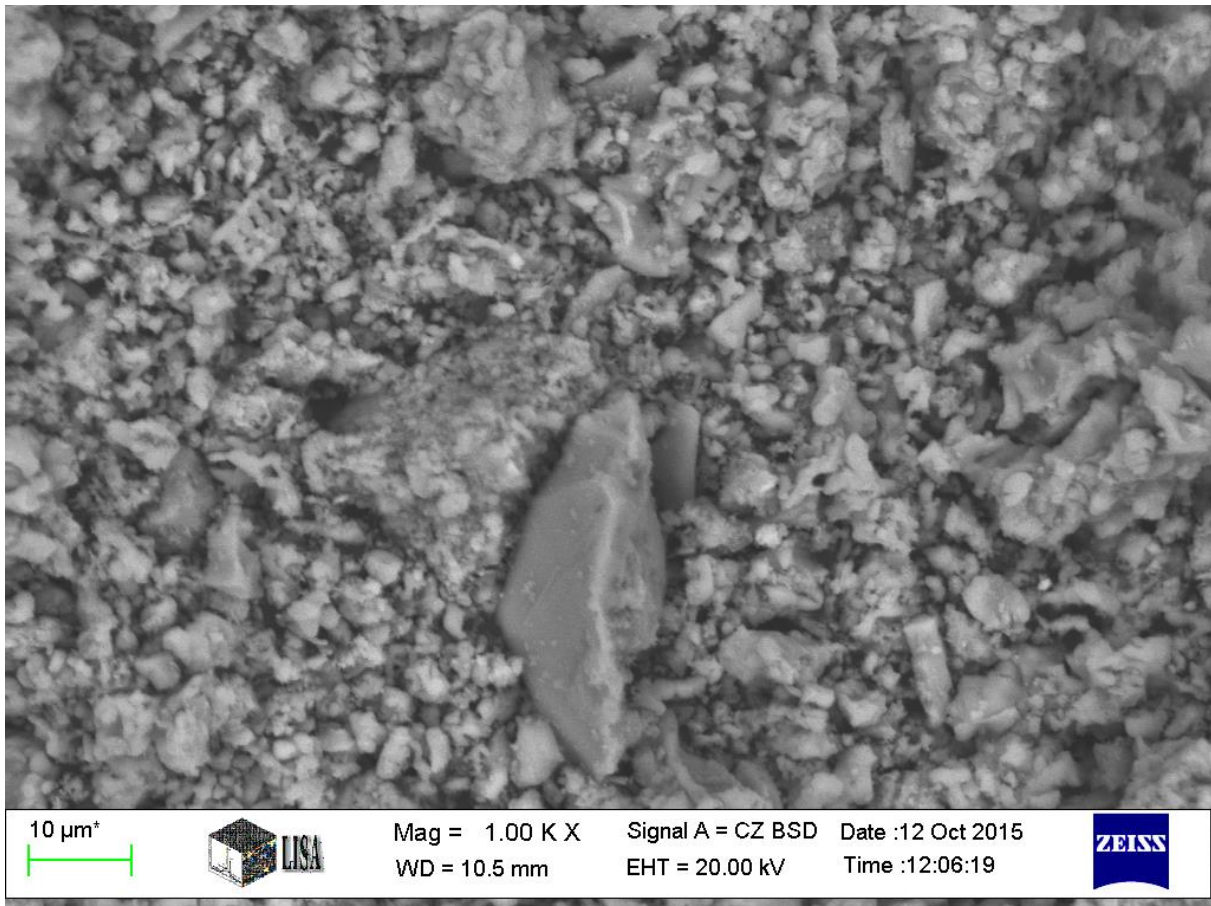
62. ábra: A szőlővenyige hamujának 500-szoros nagyítású felvétele

F:\arpad\2015\szamosi zoltan-tuztan\20151012 hamúvenyige 02 foto atlag.spc

Label A: venyige 02 foto atlag



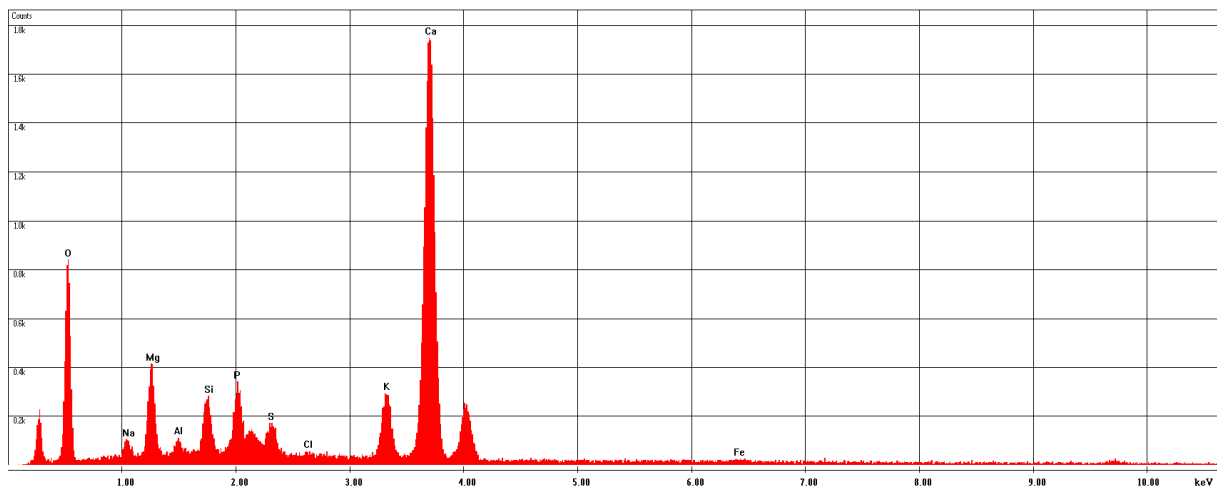
63. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-2 jelű felvétel)



64. ábra: A szőlővenyige hamujának 1000-szeres nagyítású felvétele

F:\jrapad\2015\szamosi zoltan-tuztan\20151012 hamúvenyige 03 foto atlag.spc

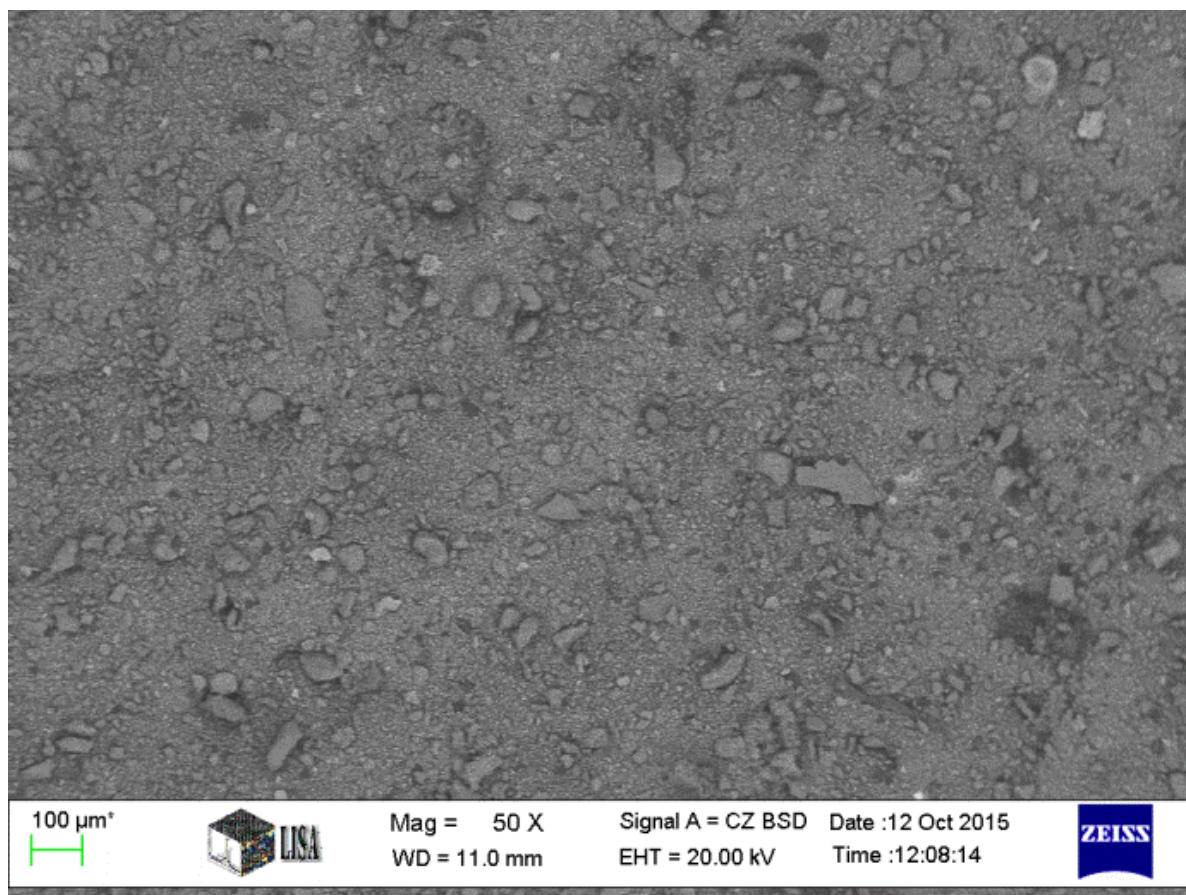
Label A: venyige 03 foto atlag



65. ábra: Az 1000-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-3 jelű felvételt)

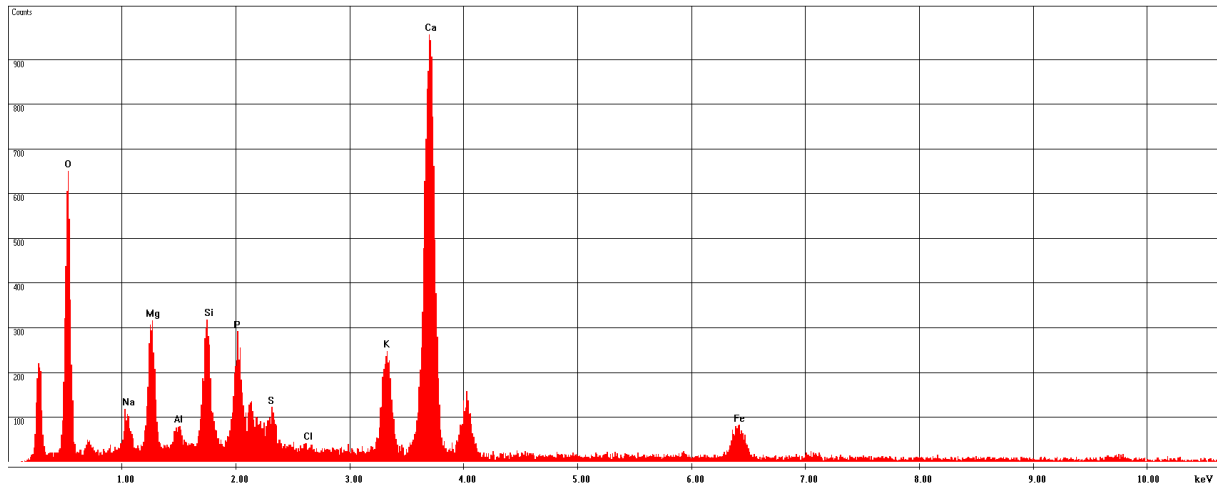
Jelölés	Na	Mg	Cl	K	Ca
	tartalom [m/m%]				
Venyige	2,31	6,01	0,51	6,9	33,1
Venyige-2	1,58	5,75	0,55	6,12	38,66
Venyige-3	1,85	5,63	0,65	5,05	36,03
Átlag	1,91	5,80	0,57	6,02	35,93

24. táblázat: A venyige elektronmikroszkópos felvételek alapján felvett elemek tartalma

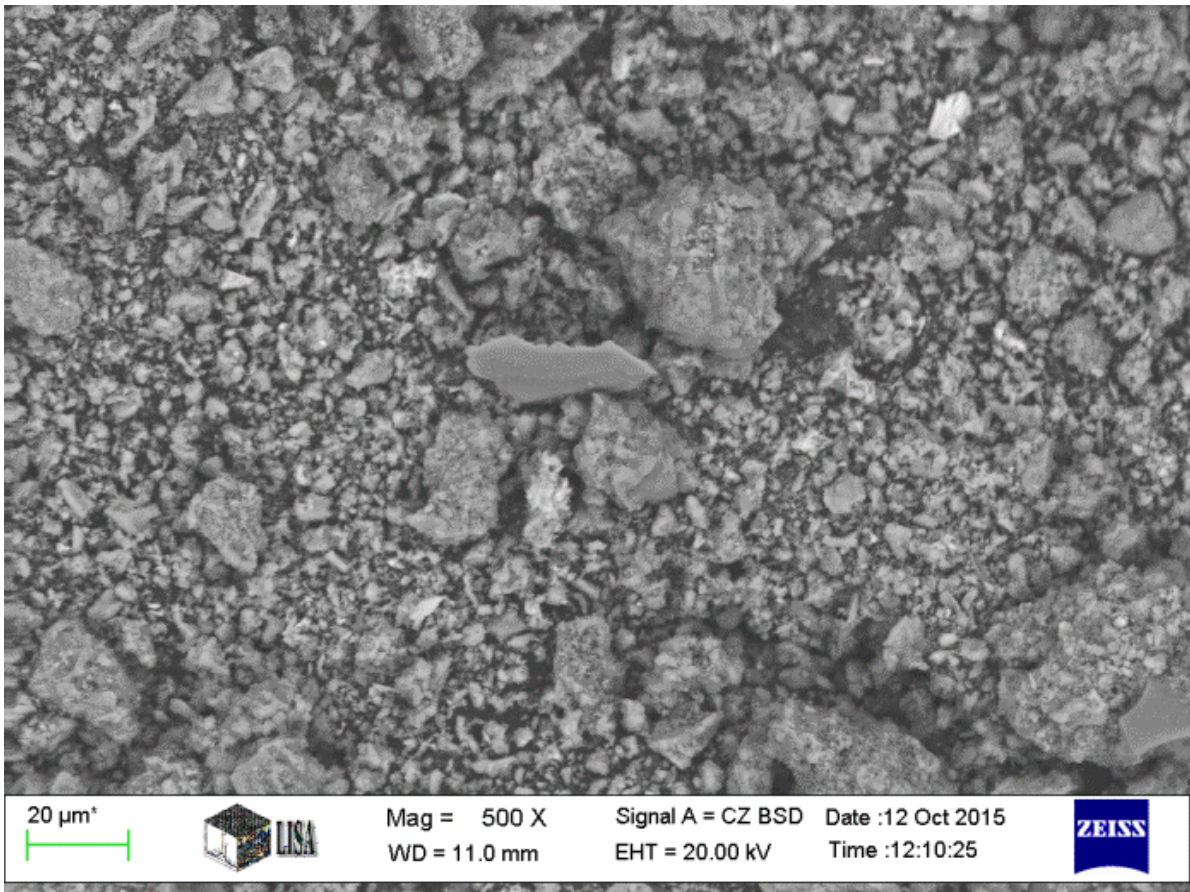


66. ábra: A pörkölt szőlővenyige hamujának 50-szeres nagyítású felvétele

Label A: venyige V1

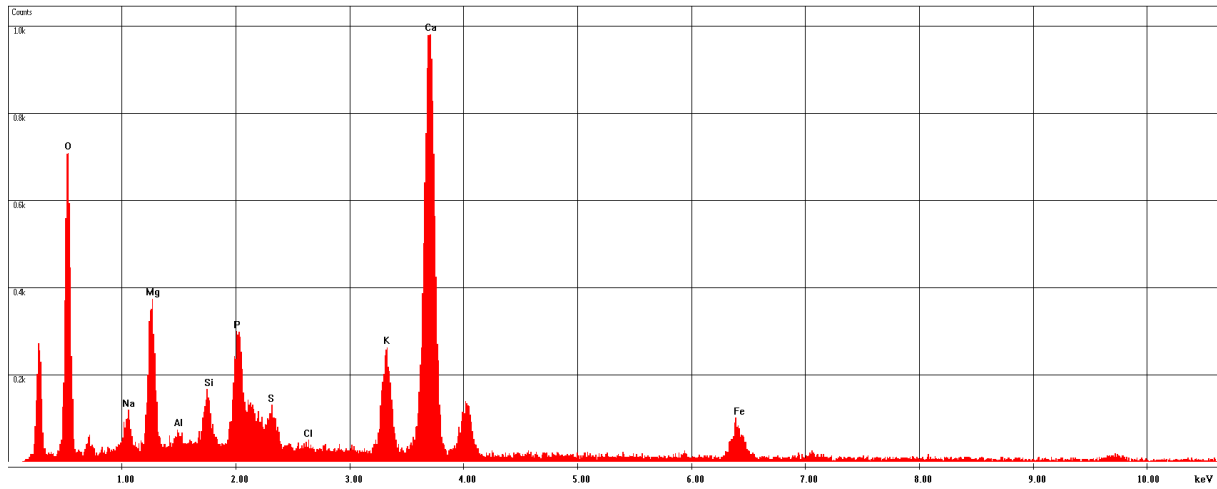


67. ábra: Az 50-szeres nagyítású felvétélről vett átlag tartalom spektruma (Venyige-V1 jelű felvétel)

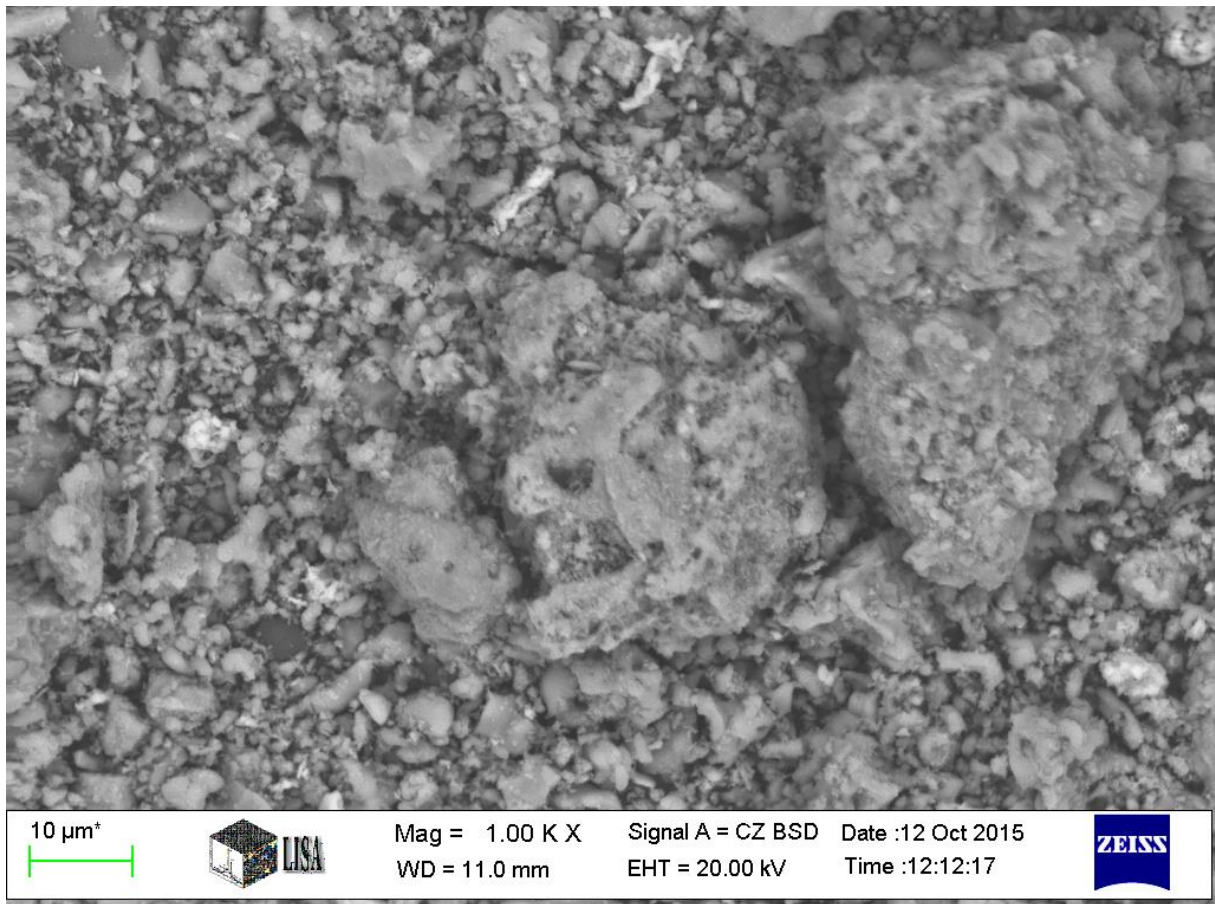


68. ábra: A pörkölt szőlővenyige hamujának 500-szoros nagyítású felvétele

Label A: venyige V1 02 foto atlag

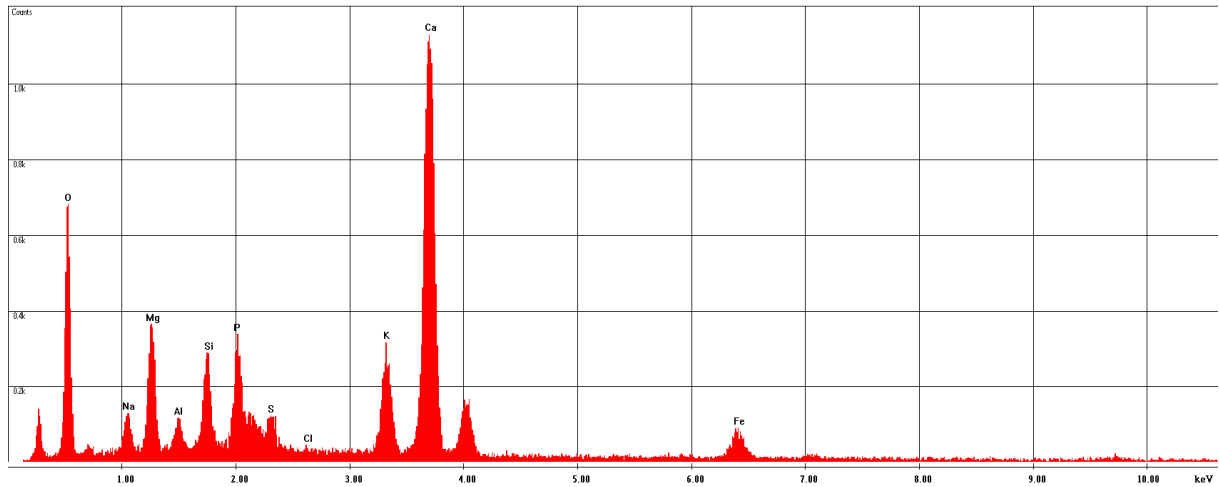


69. ábra: Az 500-szoros nagyítású felvételről vett átlag tartalom spektruma (Venyige-V2 jelű felvétel)



70. ábra: A pörkölt szőlővenyige hamujának 1000-szeres nagyítású felvétele

Label A: venyige V1 03 foto atlag



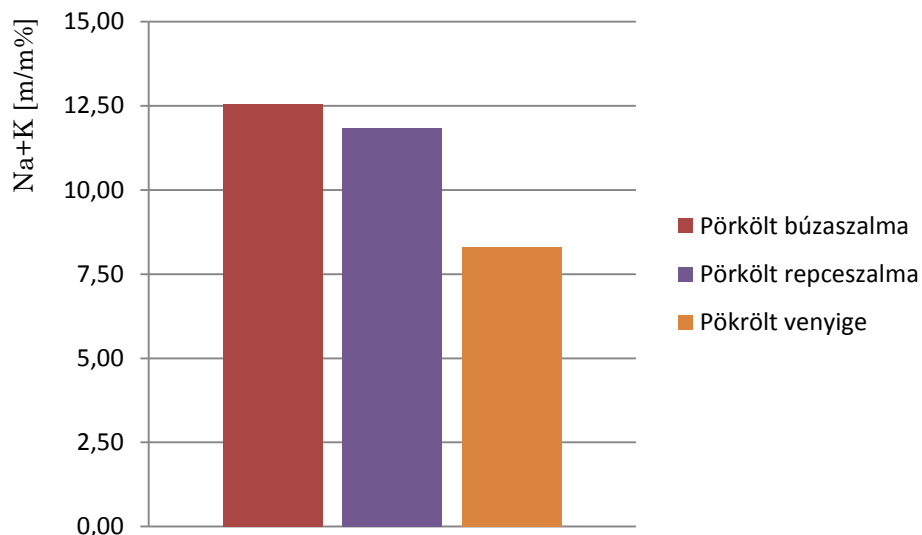
71. ábra: Az 1000-szeres nagyítású felvételtől vett átlag tartalom spektruma (Venyige-V3 jelű felvételt)

	Na	Mg	Cl	K	Ca
	tartalom [m/m%]				
Venyige-V1	2,21	6,01	0,25	6,15	29,24
Venyige-V2	2,09	6,76	0,19	5,89	29,14
Venyige-V3	2,36	6,3	0,13	6,22	31,09
Átlag	2,22	6,36	0,19	6,09	29,82

25. Táblázat: A pörkölt venyige elektronmikroszkópos felvételek alapján felvett elemi összetétele

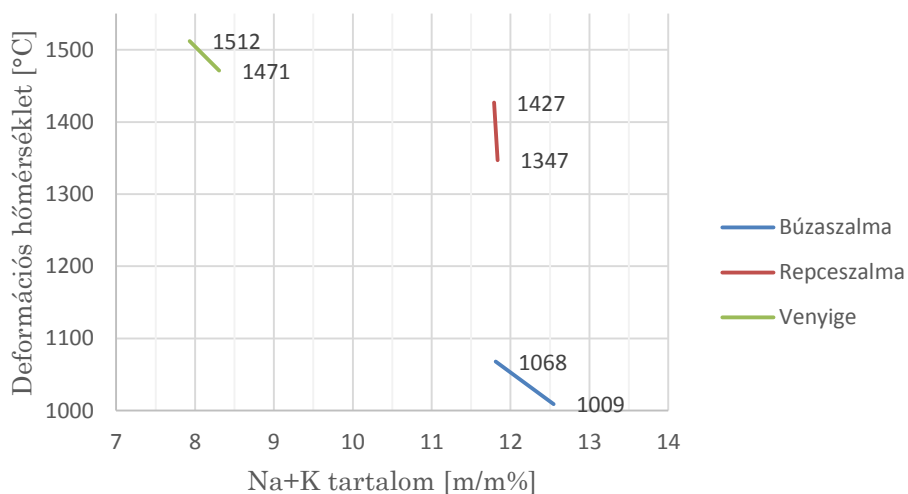
	Na	Mg	Cl	K	Ca	Na+K	Tdef
Búzaszalma	2,20	1,84	0,11	9,61	5,57	11,81	1068
Pörkölt Búzaszalma	2,45	1,01	0,08	10,10	5,64	12,55	1009
Repceszalma	1,63	3,37	0,71	10,16	35,31	11,79	1427
Pörkölt repceszalma	1,54	1,60	0,94	10,29	28,81	11,83	1347
Venyige	1,91	5,80	0,57	6,02	35,93	7,93	1512
Pörkölt venyige	2,22	6,36	0,19	6,09	29,82	8,31	1471

26. Táblázat: Az elektronmikroszkópos felvételek alapján felvett elemek átlagos tartalma összesítve



72. ábra: A nátrium és kálium tartalom az egyes pörkölt tüzelőanyagokban

Ugyan a 72. ábrán az látszik, hogy tömegszázalékban mennyi található meg az egyes mintában, de ez inkább csak jellegre utaló, azaz, hogy a búza- és repceszalma több lágyulást befolyásoló elemet tartalmaz. Ezek alapján megállapíthatom, hogy a hamulágyulási pontok csökkenése egyértelműen az alkálifémek és alkáliföldfémek dúsulása miatt történt.



73. ábra: A deformációs hőmérséklet és a nátrium és kálium tartalom közötti összefüggés

8. Visszanedvesedési vizsgálatok

A biomassza felhasználás során előfordulhat, olyan eset, mikor a nem megfelelő tárolás miatt az adott tüzelőanyag visszanedvesedik. Ez azt jelenti, hogy az anyag (alapanyag, vagy pörkölt alapanyag) a levegőből esetleg a talajból nedvességet vesz fel. Ez a jelenség fűtőértéket egyértelműen rontja. A szakirodalmi adatok alapján ez a jelenség nem, vagy csak nehezen jön létre pörkölt anyagok esetén [17]. A kutatás során megvizsgálták, különféle hőmérsékleteken kezelt faanyagok hogyan viselkedtek 85%-os relatív páratartalmú szobahőmérsékletű közegben. A mérés során a mintát magára hagyták, majd bizonyos idő elteltével megmérték a nedvességtartalmukat, 24 óra elteltével 9-10,5 m/m% közötti nedvességtartalmat mértek, míg a kezetlen fánál ez az érték 11,5-11,8 m/m% volt. Hasonlóan végeztem a visszanedvesedési vizsgálatot a tanszéki laborban egy zárható edény alján folyadékot (víz) és átnedvesített szövetet helyeztem el (74. ábra). A szövet feletti rácsra helyeztem el az ismert tömegű és nedvességtartalmú mintát. Kiindulási állapotban, majd 24 óra és 30 nappal elteltével vizsgáltam a minták tömegét és nedvességét.



74. ábra: A visszanedvesedési vizsgálat kiindulási állapotban

	24 óra múlva		30 nap múlva	
	Búzaszalma	Pörkölt búzaszalma	Búzaszalma	Pörkölt búzaszalma
Kezdeti nedvesség [%]	8,72%	4,39%	7,87%	4,18%
Vég nedvesség [%]	17,07%	9,68%	29,69%	26,63%
Kezdeti nedvesség tömege [g]	1,308	0,6585	1,181	0,627
Vég nedvesség tömege [g]	2,34	1,39	4,45	3,99

27. Táblázat: A visszanedvesedési vizsgálat kiindulási állapotban

A vizsgálat alapján elmondható, hogy a pörkölt szalma nedvesség felvevő képessége alacsonyabb, mint az alapanyagé. Tapasztalható, hogy nedves környezetben az alapanyag bomlása megindult 30 nap után, míg ez nem volt megfigyelhető a pörkölt alapanyag esetén.

9. Az alapanyag porrobbanási tulajdonságainak meghatározása

A tüzelőanyagok életútja az előállításától a végfelhasználásig különböző technológiai fázisokra bontható (pl.: szállítás, tárolás, mozgatás, pelletálás, brikettálás, szűrés, porelszívás, szétválasztás, aprítás stb...).

Ezen műveletek során elkerülhetetlen, hogy az alapanyag különböző porkoncentrációban, szemcseeloszlásban legyen jelen a technológiában, amely porrobbanási kockázatot jelent. Jelen fejezetben bemutatom a három pörkölt anyag viselkedését porrobbanás alatt. Továbbá összehasonlítom az alapanyagok porrobbanási tulajdonságaival, hogy milyen változás áll be pörkölés hatására.

Az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet Vegyipari Gépészeti Intézeti tanszék laborjában megtalálható KSEP 7.0 (Kühner AG) 20 liter űrtartalmú berendezés automatizált és reprodukálható körülmények között a felsorolt szabványi előírások szerint lehet robbanási tulajdonságokat (p_{\max} , K_{\max} , LEL, LOC, robbanóképesség) mérni porok, gázok, gőzök, és hibrid keverék közegekre:

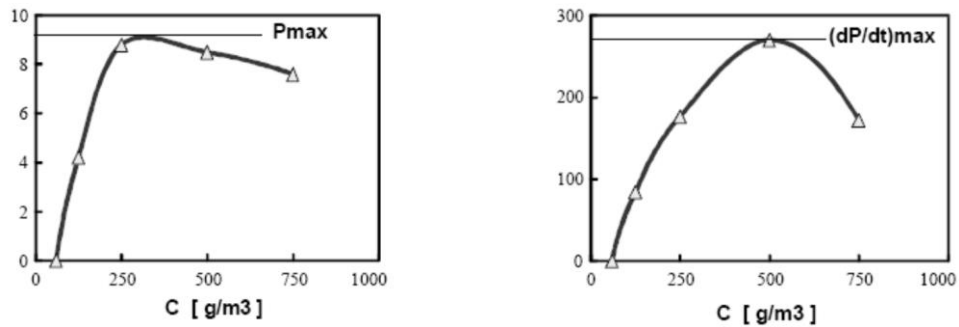
- MSZ EN 26184-1 (Robbanásvédelmi rendszerek – Robbanóképes por-levegő keverékek robbanási jelzőszámainak meghatározása) [49],
- MSZ EN 14034-1:2004+A1 (Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása – 1. rész Porfelhők legnagyobb robbanási nyomásának (p_{\max}) meghatározása) [50],
- MSZ EN 14034-2:2006+A1 (Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása – 2. rész Porfelhők legnagyobb robbanásnyomás-növekedési sebességének $(dp/dt)_{\max}$ meghatározása) [51],
- MSZ EN 14034-3:2006+A1 (Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása – 3. rész Porfelhők alsó robbanási határának (ARH-LEL) meghatározása) [52],
- MSZ EN 14034-4:2004+A1 (Porfelhők robbanási jellemzőinek meghatározása – 4. rész Porfelhők oxigén-határkoncentrációjának (OHK-LOC) meghatározása) [53].

9.1. Porrobbanások mechanizmusa

A következőkben összefoglalom a közegek robbanási tulajdonságaival, azok meghatározásával, a jellemzőket befolyásoló tényezőkkel kapcsolatos ismereteket.

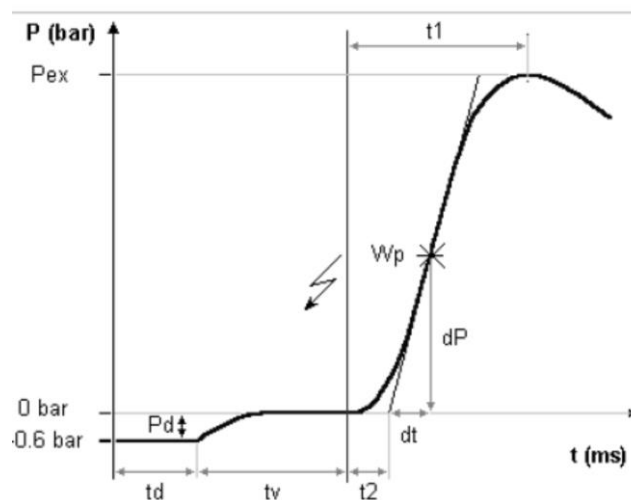
9.1.1. Robbanási jellemzők

Porrobbanás során a por és levegő keverék robbanásának erejét – a zárt tartályban történő robbanás során – a p robbanási túlnyomás és a dp/dt nyomásnövekedési sebesség határozza meg [54]. A robbanási nyomás p_{max} maximális értékét és a nyomásnövekedés sebességének maximális értékét úgy határozzuk meg, hogy egyre növekvő koncentrációval végzünk robbantásokat a szabványos berendezésben.[50,51]



75. ábra: Robbanási jellemzők meghatározása[55]

A 76. ábrán egy adott koncentrációhoz tartozó robbanási görbe látható.



76. ábra: Egy por robbanásának nyomás és idő görbéje [55]

A fenti görbén az látszik, hogy t_d idő alatt a tartályt levákuumozzuk p_a nyomásra ($p_a=0,4$ bar_a). Ezután sűrített levegővel beadagolt por a tartály belső nyomását kiegyenlíti légköri nyomásra. A beadagolást követően t_v idővel (60 ms), megtörténik a gyújtás, és elindul a robbanás. A robbanási végnyomás p_{ex} , mely a gyújtást követően t_1 időpillanatra alakul ki. Egyébiránt ezzel a vizsgálati módszerrel meghatározható a vizsgált porra vonatkozó alsó robbanási határérték (Lower Explosion Limit)[52]. A zárt tartályban mért maximális robbanási nyomás értéke – 20 liter úrtartalom felett – gyakorlatilag független a tartály alakjától (szögletes vagy gömb) és méretétől.

A nyomásemelkedés sebessége függ a tartály méretétől, mégpedig csökken, ha a tartály térfogat nő. Ezért bevezették a K_{max} értéket, mely függ a por fajtájától és a vizsgálati módszertől, ám nem függ az edény térfogatától (melyben végezzük a mérést):

$$K_{max} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad (40)$$

A szabványok porok robbanóképességére vonatkozóan bevezették az alábbi porrobbanási osztály besorolásokat, melyek a 28. táblázatban láthatók [56]:

Porrobbanási osztály	K_{max} [barm/s]	Robbanóképesség
St1	0 - 200	robbanóképes
St2	201 – 300	erősen robbanóképes
St3	> 300	nagyon erősen robbanóképes

28. táblázat: A porok veszélyesség alapján történő osztályozása

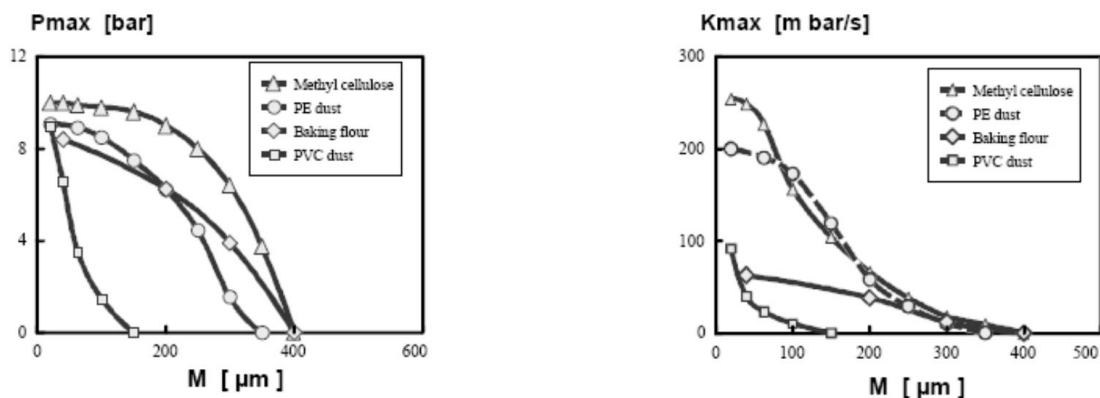
9.1.2. A robbanási jellemzőket befolyásoló tényezők

Kevertség

A keveredés foka jobbra a gyújtási késleltetés (t_v) függvénye. A t_v idő a porbefúvás pillanata és a por/levegő keverék begyújtása közötti időtartam. Befolyásolja a nyomásemelkedés maximális értékét, azaz a K_{max} értéket is. Ezért porok vizsgálatához szabványosították a gyújtás késleltetési időt. Vizsgáló berendezésünkre (20 liter) ez az érték $t_v = 60$ ms. Általában a keveredés fokozása ($t_v < 60$ ms) növeli a robbanás erejét is.

Szemcseméret

A porszemek méretének eloszlása lényeges hatást gyakorol a robbanási adatokra [57]. A szemcseméretet az M mediánal jellemezzük. A medián a szemcseméret értékek eloszlási függvényének az 50%-os értéke.



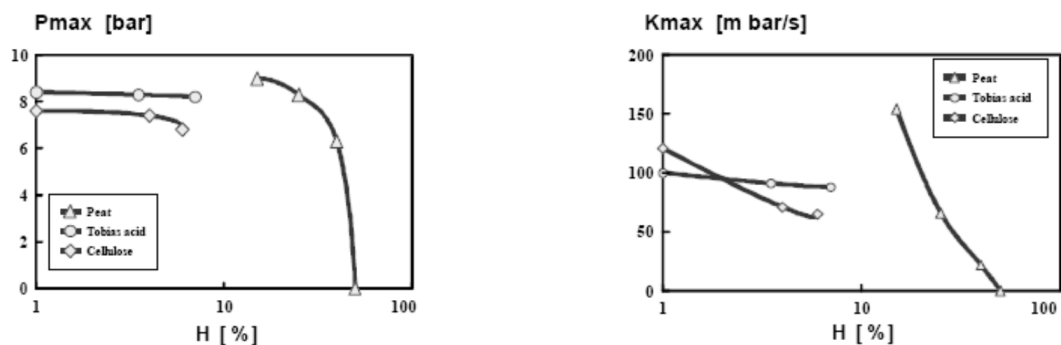
77. ábra A medián és a robbanási adatok összefüggései [55]

A 77. ábrán látható, hogy a finomabb por erőteljesebb robbanásra képes, mint a durvább szemcséből álló, ezért – az optimális adatok begyűjtése érdekében – a szemcseméretet is szabványosították: a vizsgálatra kész por szemcseméretének mediánja 63μm alatti kell, legyen.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a port szétterítő eszköznek és az adagoló szelepnek lehet egy őrlő hatása egyes porokra nézve, azaz maga a diszperziós folyamat is csökkentheti az átlagos szemcseméretet. Azokban az esetekben, ahol ez fontos lehet, az ismert szemcseméretű porral előzetesen el kell végezni egy adagolást (befújást) robbantás nélkül, és a tartályból visszanyert por szemcseméretét újra meg kell vizsgálni, hogy változott-e. Olyan reprezentatív mintánál, amelynél az előírt medián feltétel nem teljesül – a technológiában nem lelhető fel finom frakció – a minta előkészítéssel egy finomabb port vizsgálunk, így nagyobb robbanóképességet állapítunk meg, mint amely technológiára jellemző lenne, mivel nem zárható ki, hogy technológiai folyamat során (pl.: szállítás) a szemcsék aprózódása következik be.

A por nedvességtartalma

A vizsgálandó termék relatív nedvességtartalma szintén befolyásoló tényező, amint a 78. ábra mutatja.

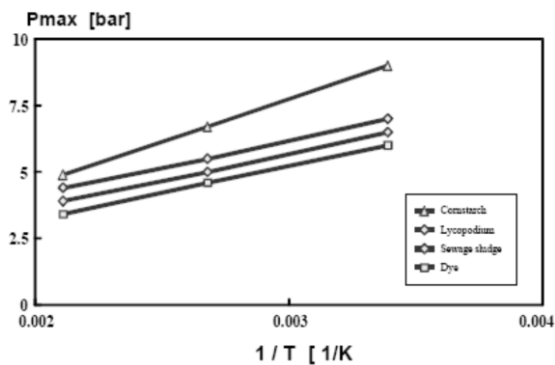


78. ábra: A nedvességtartalom hatása a robbanás jellemzőire [55]

A porok esetében legalább 50%-os relatív nedvességtartalom kell ahhoz, hogy a por robbanóképességét elveszítse. Ugyancsak látható az ábrából, hogy 10% alatti relatív nedvességtartalom beállítása szükséges ahhoz, hogy a robbanási adatok jelentősen ne módosuljanak, a vonatkozó szabványok is ezt az értéket írják elő a vizsgálatok megkezdéséhez.

Hőmérséklet

Az ipari folyamatokban a hőmérséklet meghatározó fontosságú paraméter. A hőmérséklet emelkedése csökkenteni fogja az alsó robbanási határértéket. A hőmérsékletnek a p_{max} értékre is hatása van, így azt is számításba kell venni. A 79. ábra mutatja az összefüggést a hőmérséklet növekedése és a p_{max} csökkenése között. A jelenség az oxigén tartalom csökkenésével függ össze.



79. ábra: A hőmérséklet hatása a p_{max} értékre [55]

A K_{max} értékét is befolyásolja a hőmérséklet. A reakcióképesebb poroknál a magasabb hőmérséklet a K_{max} lineáris csökkenését okozza. A lassabban reagáló poroknál viszont nő a K_{max} érték. A gyakorlatban a hőmérséklet hatását a K_{max} értékére elhanyagolhatónak tekinthetjük.

Kezdeti nyomás

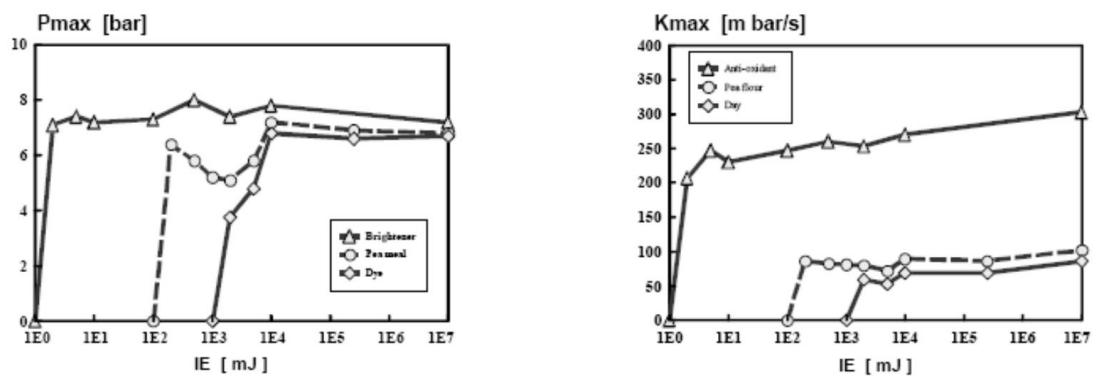
A p_{max} és K_{max} robbanási jellemzők egyenesen arányosak a kezdeti nyomással, mely a gömb belsejében a gyújtás pillanatában fennáll. Az összefüggés egészen ~3 bar nyomásig lineáris.

A gyújtás módja és a gyújtási energia

A minimális gyújtási energiával kapcsolatban az 1 m³-es tartály és a 20 literes gömb segítségével végzett nagyszámú mérés alapján a porokat két csoportra lehet osztani a gyújtás módjának és a gyújtás energiájának a robbanási adatokra gyakorolt hatása alapján.

- Energiafüggetlen porok

A 80. ábra mutatja, hogy – a mérési bizonytalanságot is figyelembe véve – bizonyos poroknál a gyújtás és a gyújtási energia módja (kémiai gyújtó 250 J ... 10 kJ, kondenzátor kisültség $IE > MIE$) gyakorlatilag nem befolyásolja a robbanási adatokat.



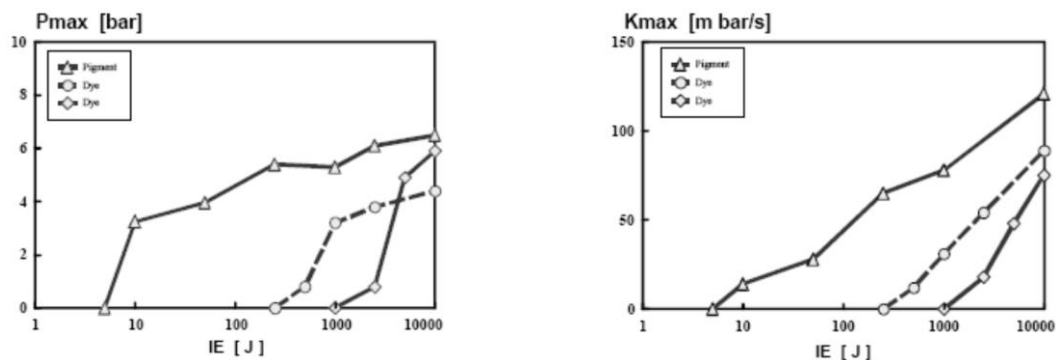
80. ábra: Az energiafüggetlen porok nyomásnövekedése a gyújtási energia függvényében [55]

Ezekből az adatokból látható, hogy az ún. energiafüggetlen poroknál mindegy, hogy gyenge kondenzátor kisülést vagy 10 kJ-os kémiai gyújtót használunk, ugyanazokat a vizsgálati eredményeket fogjuk kapni.

Általánosságban ezeknek a poroknak a gyújtási energiája kevesebb, mint 1 J.

- Energiafüggő porok

Az ebbe a csoportba tartozó poroknál a gyújtási energia csökkentése a K_{max} érték egyenesen arányos csökkenésével jár.



81. ábra: Az energiafüggő porok definíciója [55]

A robbanási túlnyomást gyakorlatilag nem befolyásolja a gyújtási energia, csak kevés számú pornál tapasztalható, hogy a gyújtási energia csökkentésével a nyomás is csökken. Általánosságban az ebbe a csoportba tartozó poroknak a gyújtási energiája kevesebb, mint 1 J.

A robbanási jellemzők meghatározásához megfelelő energiájú gyújtókra van szükség. A szabvány előírásai szerint egyetlen gyújtási mód van, mely megbízható adatokhoz (p_{\max} , K_{\max}) juttat minket a 2 db 5kJ-os kémiai gyújtó, 10kJ összenergiával.

A mérések esetén is ilyen kémiai gyújtót alkalmaztam, mely adatai a 29. táblázatban láthatók.

Gyártó	Simex Control s.r.o.
Gyújtó fajtája	Kémiai gyújtó
Gyújtási energia	10 kJ

29. Táblázat: Az alkalmazott gyújtó adatai

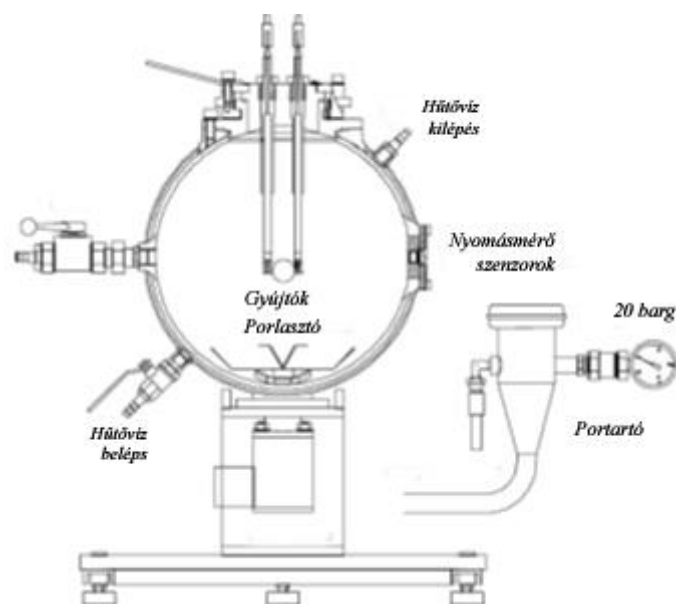
Ha kémiai gyújtó helyett egy körülbelül 10kJ energiájú elektromos ívet alkalmazunk, akkor a mért K_{\max} értékek 60%-kal alacsonyabbak lehetnek. Ennek oka a robbanási mechanizmus felépülése, mert a kémiai gyújtó használatával az inicializálás tulajdonképpen egy gömb felületén történik, szikra esetén pedig vonali gyújtást alkalmazunk. Továbbá az elektromos gyújtás ideje hosszabb, mint a kémiai kisülés ideje. Ez akkora eltérés, hogy ennek a gyújtóforrásnak a használata nem megengedhető, hiszen az éghető porok robbanási paramétereinek jelentős alábecsülésével járhatna, ami biztonsági szempontból kockázatos.

9.2. A KSEP 7.0 vizsgáló berendezés

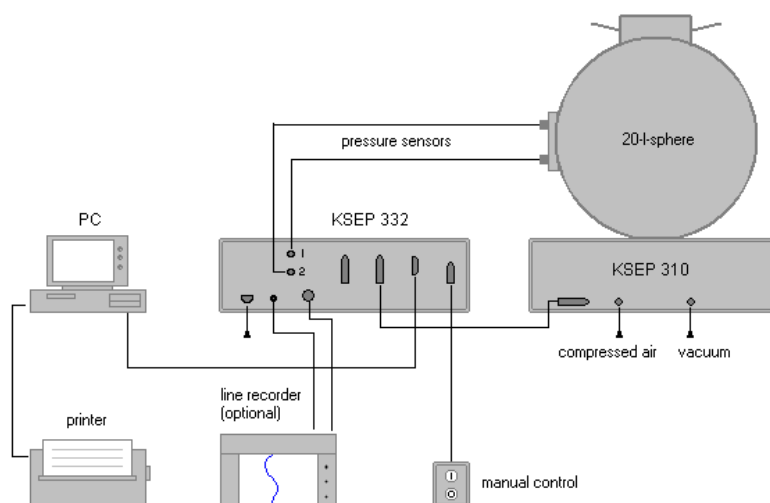
A vizsgáló kamra egy korrózióálló acélból készült duplafalú gömb, melynek belső térfogata 20 liter. A dupla fal folyadék áramoltatását teszi lehetővé a kamra körül, a mérések során így biztosíthatjuk az állandó hőmérsékletet. Ezen mérések esetében kizárólag hűtésre volt szükség.

A vizsgálandó port (búzaszalma, repceszalma, venyige és a pörkölt változataik) egy nyomás alatt lévő adagológamrából egy kimeneti szelepen és szórófejen keresztül fújjuk be a gömb belsejében lévő robbantási térbe létrehozva a homogén poreloszlást. A kimeneti szelep pneumatikus működtetésű, a nyitást és zárást egy segéddugattyú végzi. A sűrített levegő áramlását elektromos szelep vezérli.

A gyújtószerkezet a gömb középpontjában található. A gömb oldalán lévő egyik kivezetésen két Kistler piezoelektromos nyomásérzékelő található. A másik kivezetés további mérőeszközök elhelyezésére szolgálhat, vagy a betekintő ablakot lehet rárögzíteni.



82. ábra: A berendezés vázlatja[55]



83. ábra: A rendszer kapcsolási vázlatja[55]

A portároló kamra nyomása megegyezik a sűrített levegős rendszerével (általában 20 bar túlnyomás).

A por bekeverése előtt a gömbben a nyomást – az erre szolgáló golyóscsap nyitásával, vákuumszivattyú segítségével, a vákuumszűrőn keresztül – csökkenteni kell olyan mértékig (-0,6 bar_g), hogy a portartó kamrában lévő levegővel együtt a por befújása után a vizsgálat megkezdéséhez szükséges nyomás (légköri) álljon elő a gömb belső terében.

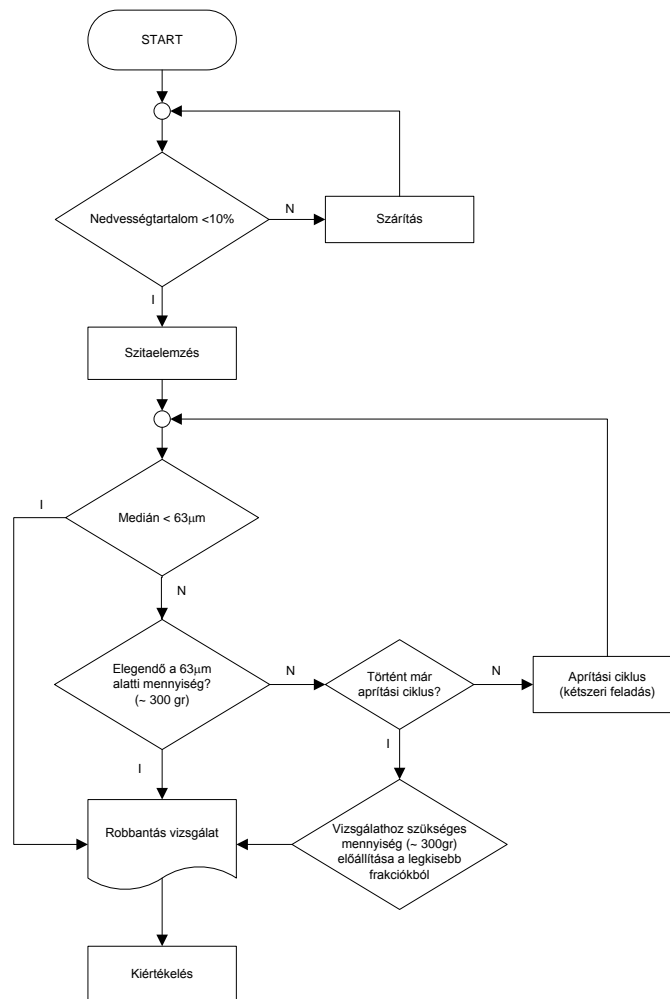
A KSEP piezoelektromos érzékelőket használ a nyomásnak az idő függvényében történő méréséhez, valamint kezeli a mágnes szelepeket és a 20 literes gömb gyűjtőszerkezetét is. Két egymástól független mérőcsatorna segíti a hibás mérések elkerülését, illetve lehetőséget nyújt az öntesztre is, mely minden mérés előtt ajánlott a vizsgálati protokoll szerint.

9.3. Vizsgálatok rendszere

9.3.1. Vizsgálati eljárás

Egyik minta mediánértéke sem haladhatja meg a 63 μm -t. Továbbá amennyiben nem teljesül a 10% alatti nedvességtartalom a mintát szárítani kell vákuumban 50 °C-on, vagy légköri nyomáson 75°C-on. Mivel mindhárom alapanyag minta kellően száraz volt, nem kellett szárítani.

A vizsgálati eljárás folyamatábráját az alábbi ábra mutatja:



84. ábra: A vizsgálat folyamatábrája

A szemcseméret eloszlást és a medián értéket szitaelemzéssel határozzuk meg. A szitaelemzés során 32 – 63 – 125 – 200 – 400 – 800 – 1800 mikron lyukméretű szitasorozatot és Retsch rázógépet használtam.

A vizsgált minták esetén egyik sem teljesítette a 63 μm medián feltételt így a következő minta előkészítési lépéseket hajtottam végre:

- minta aprítása kétszeri feladással,

- újabb mintaelemzés.

9.3.2. Robbanási jellemzők meghatározása (p_{\max} , K_{\max})

Gyújtóforrás kémiai gyújtó

Gyújtó energia (IE) 2 x 5 kJ

Gyújtás késleltetés (t_v) 60 ms

Az első tesztsorozatban a maximális robbanási túlnyomást és a maximális nyomás növekedési sebességet határozzuk meg egy széles koncentráció tartományban. Alacsony, 60 g/m³ (1,2 g / 20 liter) koncentrációval kezdünk és fokozatosan növeljük azt. A méréseket addig végezzük, amíg a maximális értéket a robbanási túlnyomásnál és a nyomásnövekedésnél meg tudjuk határozni. A következő por sűrűség fokozatokat kell végigtesztelni. A porminta tömege az a pormennyiség, amit sűrített levegővel a gömb belsejébe jutattunk.

Koncentráció [g/m³]	60	125	250	500	750	1000	1250
Porminta tömege [g]	1,2	2,5	5	10	15	20	25

30. Táblázat: Az egyes koncentrációkhoz tartozó porminták tömege

Az első tesztsorozat befejezése után az észlelt maximális nyomásérték környezetében még kontrollmérést kell végezni (pl.: ha az első mérésorozat azt mutatja, hogy a p_{\max} és $(dp/dt)_{\max}$ értékek maximuma 500 g/m³, akkor a p_{\max} és $(dp/dt)_{\max}$ érték előtti és utáni (250; 500; 750 g/m³) koncentrációknál szükséges azt elvégezni).

A gömb edényben történő mérés kiértékelése automatikusan a beépített szenzor segítségével történik. A mérés akkor megfelelő, ha a mért értékek teljesítik az alábbi feltételeket:

- p_{ex} , p_m : A két szenzor által mért nyomásértékek különbsége kisebb, mint 0,3 bar.
- dp/dt : A két nyomásérzékelő által mért nyomásnövekedési sebesség átlaga kevesebb, mint 10%-kal tér el egymástól.
- p_d : Expanziós nyomás belül van az elfogadható 0,55 ... 0,7 bar tartományon.
- t_d : A porbefújást végző szelep működésének késleltetése belül van az elfogadható 30 ... 50 ms tartományon.
- t_v : a mért gyújtási késleltetés kevesebb, mint 5 ms-mal tér el a megadott t_v értéktől.

A p_{\max} és $(dp/dt)_{\max}$ értékek a három robbantás sorozat maximum értékeinek számtani átlagai, a K_{\max} is az így kapott $(dp/dt)_{\max}$ értékből számolandó a 20 l térfogat behelyettesítésével.

$$p_{\max} = \frac{p_{m_1} + p_{m_2} + p_{m_3}}{3} \quad (41)$$

$$(dp/dt)_{\max} = \frac{(dp/dt)_1 + (dp/dt)_2 + (dp/dt)_3}{3} \quad (42)$$

$$K_{\max} = 0,02^{1/3} \cdot (dp/dt)_{\max} \quad (43)$$

A p_{\max} érték három mérési sorozatból kapott három maximumérték átlagértéke. A három maximumérték eltérése a p_{\max} -tól a 10%-ot nem haladhatja meg, egyébként a mérési sorozatot meg kell ismételni.

A $(dp/dt)_{\max}$ érték is a három mérési sorozatból kapott 3 db maximumérték átlagértéke. A 3 maximumérték eltérése a $(dp/dt)_{\max}$ -tól az alábbi táblázatban közölt értékeket nem haladhatja meg. Egyébként a mérési sorozatot meg kell ismételni.

$(dp/dt)_{\max}$ [bar/s]	K_{\max} [barm/s]	Eltérés
< 185	< 50	± 30 %
186 – 370	51 – 100	± 20 %
371 – 740	101 – 200	± 12 %
> 740	> 200	± 10 %

31. Táblázat: A maximumértékek eltérései

A porrobbanási vizsgálatokat minden kiindulási és a hőkezelt mintákra végeztem el.

9.4. Kísérleti vizsgálatok

9.4.1. Nedvességtartalom meghatározása

A nedvességtartalom meghatározásához a Shimadzu MOC-120 (SN: D451005747) gyorsnedvesség-meghatározó műszert alkalmaztam. A mérések során a vizsgált anyagot 105 °C-ra melegítettem és a műszer folyamatosan rögzítette a tömegváltozást. A mérést addig folytatta a műszer, míg a tömegváltozás 0,05%-alá nem esett.

A mért eredményeket a következő táblázatban láthatjuk:

Megnevezés	Nedvesség-tartalom	Nedvesség-tartalom	Nedvesség-tartalom
Búzaszalma	9,64	9,32	9,66
Pörkölt búzaszalma	3,21	3,44	2,56
Repceszalma	7,05	7,00	6,93
Pörkölt repceszalma	3,21	3,12	3,43
Szőlővenyige	8,33	7,53	7,42
Pörkölt szőlővenyige	3,34	3,45	3,52

32. Táblázat: Mért nedvességtartalmak, V/V %-ban

9.4.2. Szemcseeloszlás meghatározása

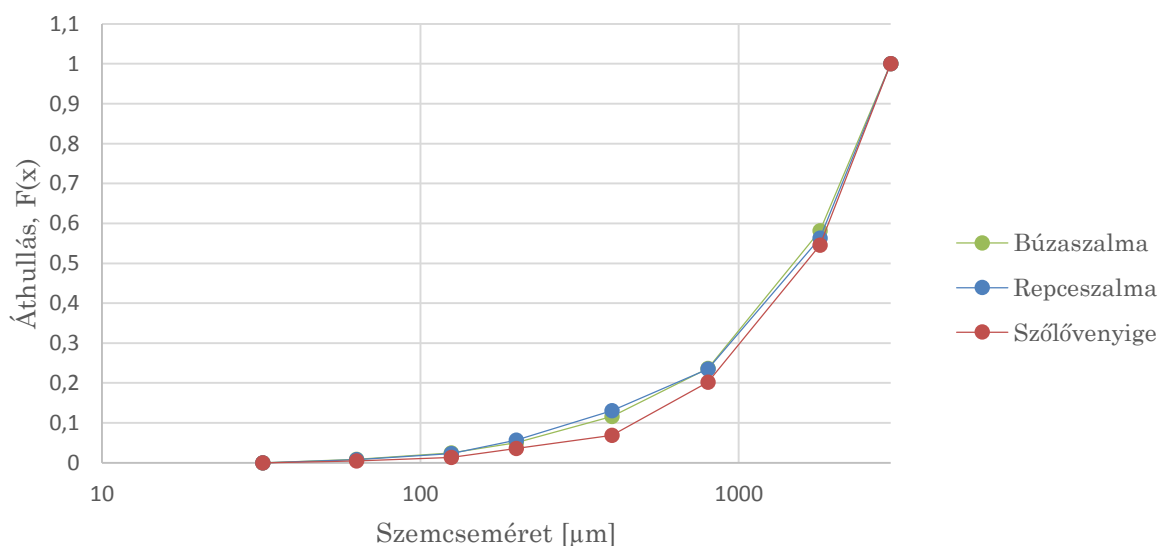
A szemcseeloszlás meghatározásához Retsch AS200-as rázógépet alkalmaztam. A szitafrakció elemzések célja, hogy meghatározzam a szilárd szemcsés anyaghalmaz mediánját, ugyanis az x_{50} -es értéknek (medián) $63\ \mu\text{m}$ -nél kisebbnek kell lennie a porrobbanási kísérletek elvégzéséhez [51]. A minták tömege $1\ \text{kg}$ volt és aprítás után mintakisebbitéssel történt a mintavétel minden esetben.

Eredeti minták

Szitafrakció, [μm]		Búzaszalma [g]	Repceszalma [g]	Szőlővenyige [g]
0	32	0	0	0
32	63	0,35	0,35	0,21
63	125	0,66	0,66	0,43
125	200	1,01	1,5	1,1
200	400	2,67	3,3	1,6
400	800	4,85	4,6	6,5
800	1800	13,92	14,56	16,7
1800	-	16,89	19,4	22,1

33. Táblázat: Szitálás eredménye („Eredeti minta”)

A fenti szitafrakciók feldolgozása során az alábbi áthullás-maradvány görbéket kaptam:



85. ábra: Az eredeti minták szemcseanalízis eredménye

Anyagféleség	Mediánérték [μm]
Búzaszalma	1564
Repceszalma	1625
Szőlővenyige	1660

34. Táblázat: Az eredeti minták mediánértékei

A kiindulási minta vizsgálatra alkalmatlan, ezért szükségessé vált az aprításuk.

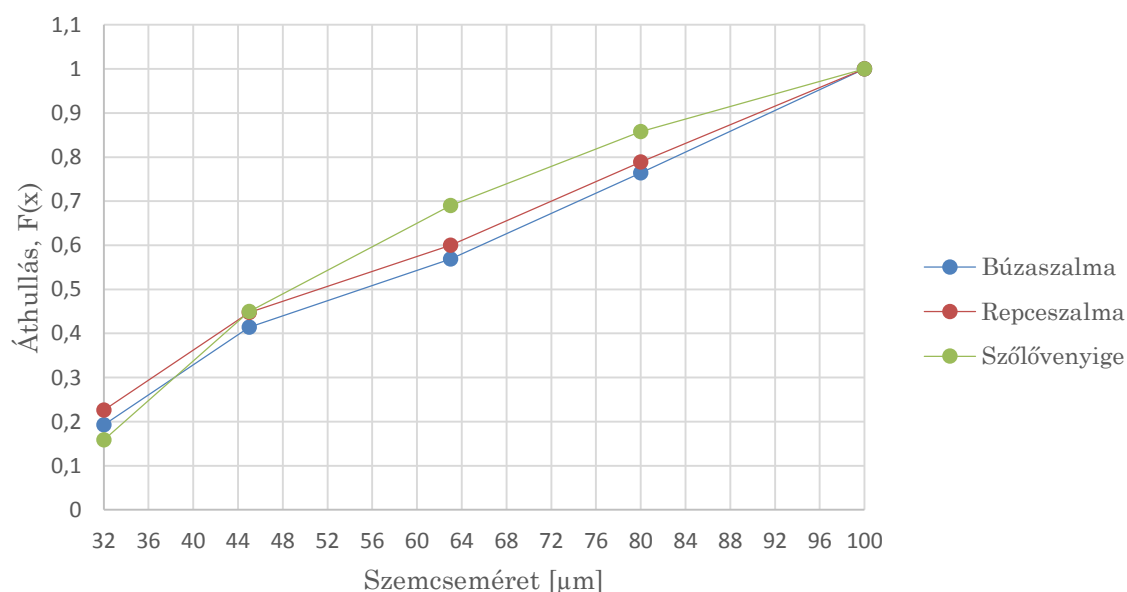
Aprított eredeti minták

Az átadásra került minta kétszeri aprítás (vágóórló) utáni szemcseeloszlása a 35. táblázatban látható.

Szitafrakció, [µm]		Búzaszalma [g]	Repceszalma [g]	Szőlővenyige [g]
0	32	15,52	18,2	12,1
32	45	17,89	17,82	22,2
45	63	12,48	12,33	18,32
63	80	15,76	15,2	12,76
80	100	19	17	10,87
100	200	0	0	0

35. Táblázat: Szitálás eredménye („Kétszer őrölt minta”)

A fenti szitafrakciók feldolgozása során a 86. ábrán látható áthullás-maradvány görbéket vehetjük fel.



86. ábra: Szemcseanalízis eredménye

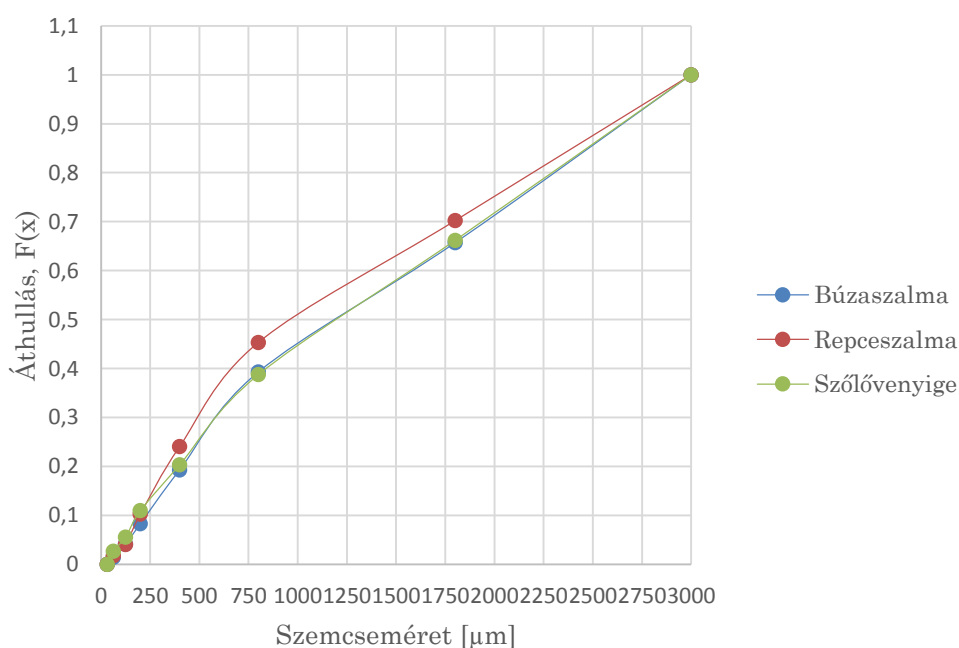
Anyagféleség	Mediánérték [µm]
Búzaszalma	55
Repceszalma	52
Szőlővenyige	49

36. Táblázat: A kétszer őrölt minták mediánértékei

Pörkölt minták

Szitafrakció [μm]		Búzaszalma [g]	Repceszalma [g]	Szőlővenyige [g]
0	32	0	0	0
32	63	0,35	0,44	0,67
63	125	0,66	0,58	0,71
125	200	1,01	1,54	1,32
200	400	2,67	3,45	2,31
400	800	4,85	5,3	4,53
800	1800	6,4	6,2	6,75
1800	-	8,32	7,43	8,32

37. Táblázat: A pörkölt minták szemcseanalízis eredménye

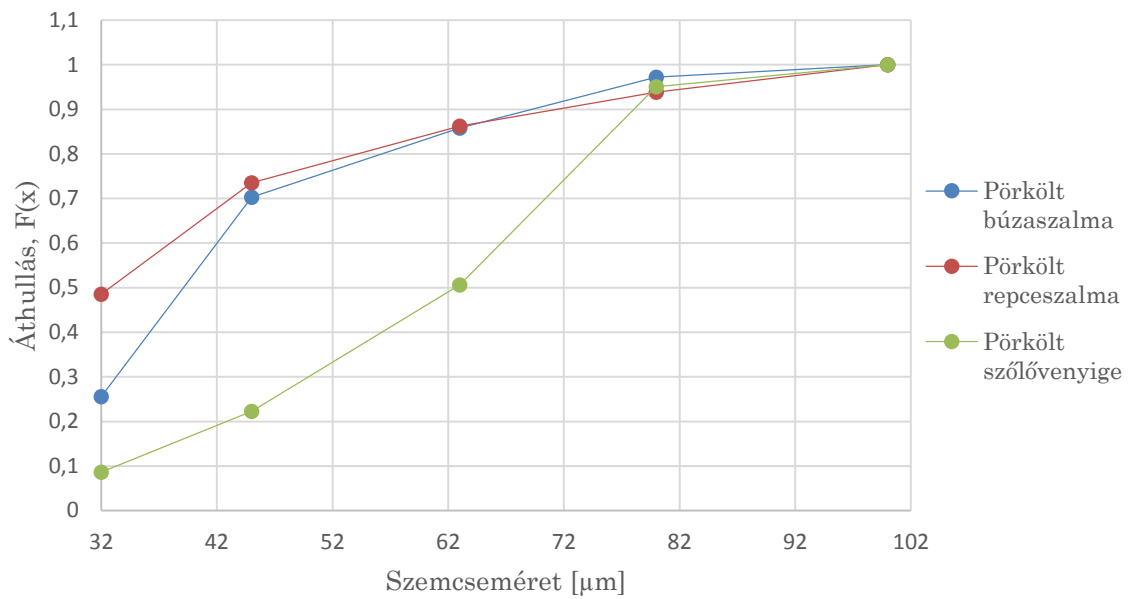


87. ábra: Szemcseanalízis eredménye

A pörkölt termékek esetén azt tapasztaltam, hogy a pörkölés után csak egyszeri feladás már megfelelő szemcseeloszlást eredményezett.

Szitafrakció, [μm]		Búzaszalma [g]	Repceszalma [g]	Szőlővenyige [g]
0	32	5,6	11,87	2,1
32	45	9,8	6,1	3,3
45	63	3,4	3,1	6,89
63	80	2,5	1,87	10,77
80	100	0,6	1,5	1,2
100	200	0	0	0

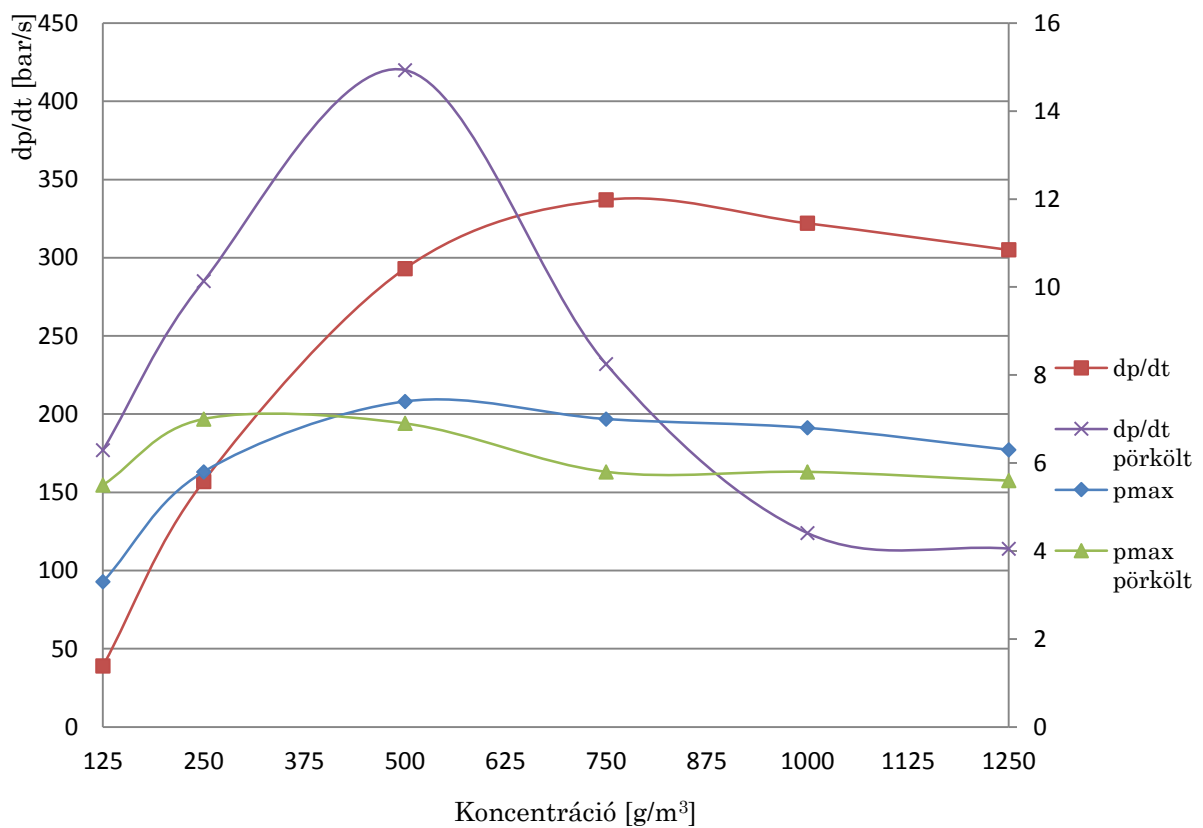
38. Táblázat: A pörkölt aprított minták szemcseanalízis eredménye



88. ábra: Szemcseanalízis eredménye

9.4.3. Búzaszalma és pörkölt búzaszalma robbanási jellemzőinek vizsgálata

Az elvégzett vizsgálatok eredményeinek összefoglalását a 89. ábra mutatja.

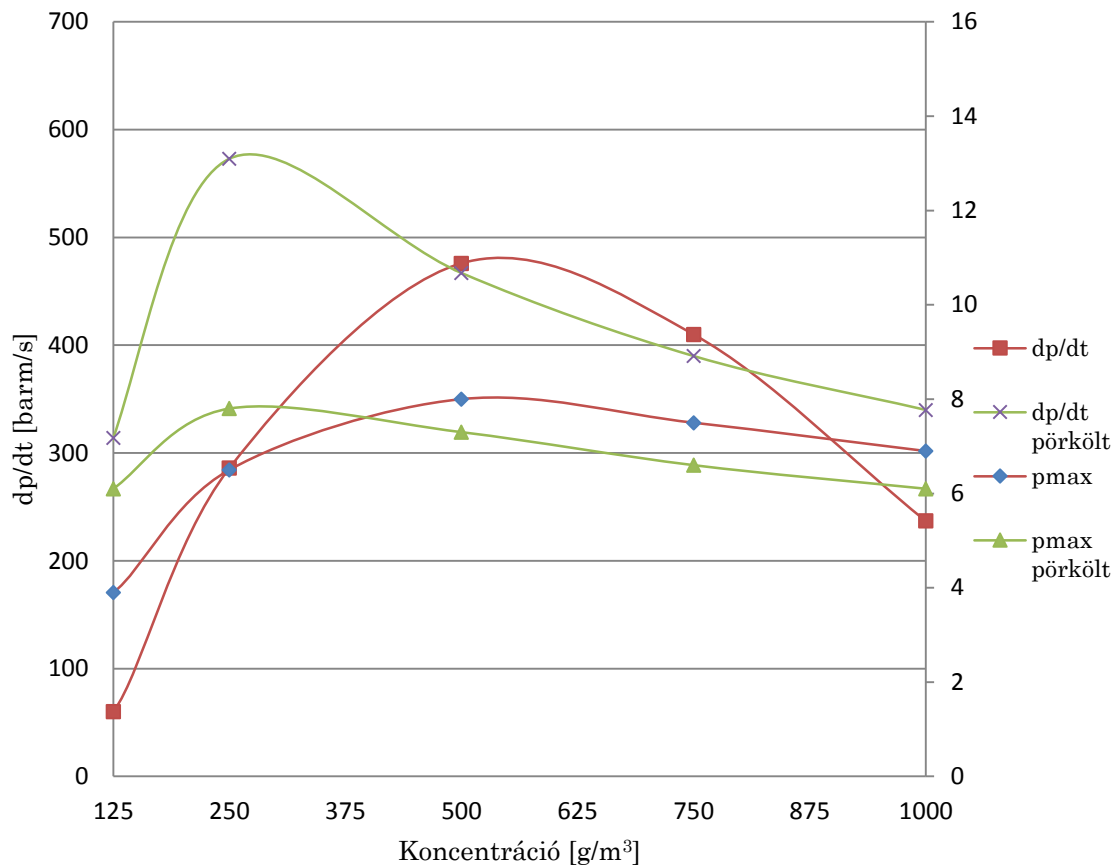


89. ábra: A búzaszalma és a pörkölt búzaszalma p_{max} , dp/dt diagramja a koncentráció függvényében

A 89. ábráról leolvasható, hogy a nyomásnövekedési sebesség megnőtt és alacsonyabb koncentráció felé tolódott (750 g/m^3 , helyett 500 g/m^3). Ugyan a maximális nyomás értéke a pörkölt búzaszalma esetén alacsonyabbra adódott, elmondhatjuk, hogy az alacsonyabb koncentrációnál gyorsabb nyomásnövekedés összességében veszélyesebbé teszi a mintát.

9.4.4. Repceszalma és pörkölt repceszalma robbanási jellemzőinek vizsgálata

Az elvégzett vizsgálatok eredményeinek összefoglalását a 90. ábra mutatja.

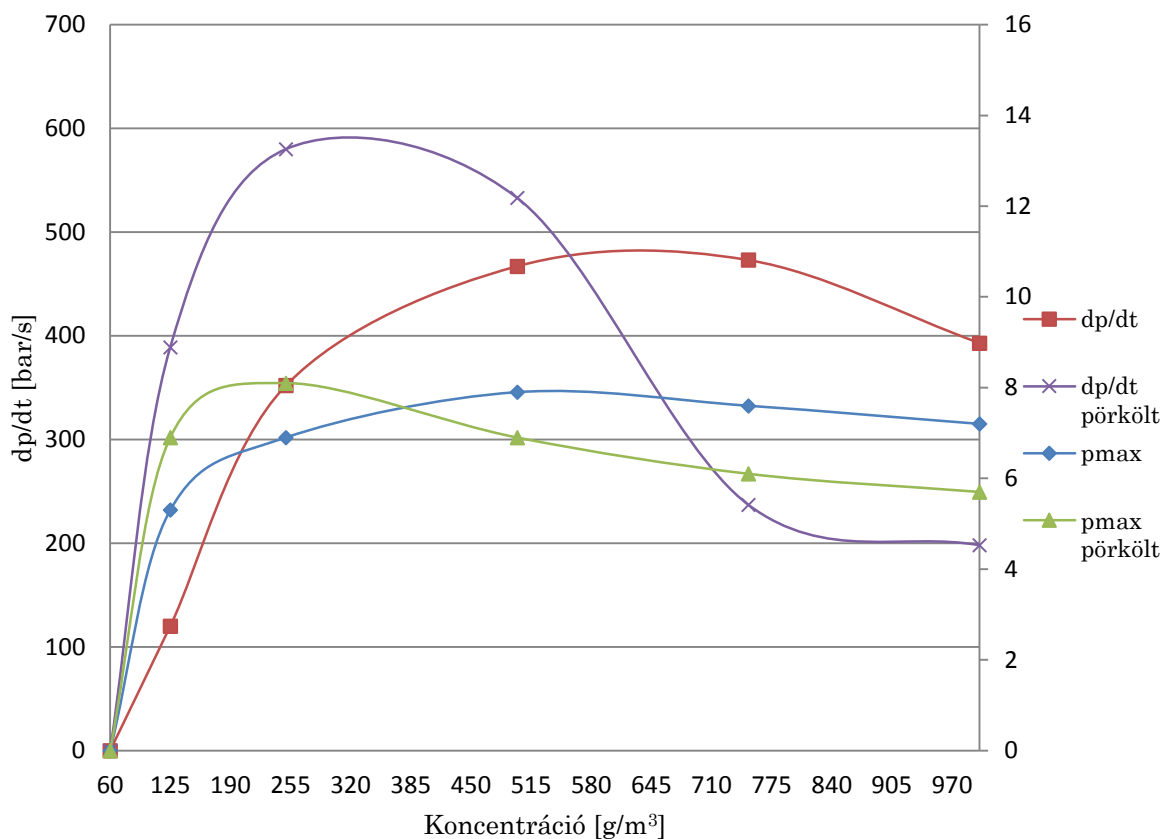


90. ábra: A repceszalma és a pörkölt repceszalma p_{max} , dp/dt diagramja a koncentráció függvényében

A 90. ábráról leolvasható, hogy a nyomásnövekedési sebesség 20,4%-kal megnőtt és alacsonyabb koncentráció felé tolódott (500 g/m^3 , helyett 250 g/m^3). A maximális nyomás értéke kismértékben csökkent (8 bar-ról, 7,8 bar-ra), összességében megállapíthatjuk, hogy a pörkölés veszélyesebbé teszi ezt a mintát is.

9.4.5. Szőlővenyige és a pörkölt szőlővenyige robbanási jellemzőinek vizsgálata

Az elvégzett vizsgálatok eredményeinek összefoglalását az alábbi diagram mutatja.



91. ábra: A szőlővenyige és a pörkölt venyige p_{max} , dp/dt diagramja a koncentráció függvényében

A fent bemutatott mérési eredmények alapján egyértelműen kijelenthetjük, hogy a pörkölés, mint tüzelőanyag előkészítési technológia, az alapanyagok porrobbanási tulajdonságait megváltoztatja, mindegyik alapanyag a veszélyesebb lett.

Az alábbi összefoglaló táblázatban láthatjuk az eredményeket mind az eredeti mind a pörkölt anyagokra is.

	p_{max}	K_{max}	p_{max} változás [%]	K_{max} változás [%]
Búzaszalma	7,4	104	-5,4	24,6
Pörkölt búzaszalma	7	129		
Repceszalma	8	147	-2,5	20,4
Pörkölt repce-szalma	7,8	177		
Szőlővenyige	7,9	146	2,5	22,6
Pörkölt szőlővenyige	8,1	179		

39. táblázat: A porrobbanási vizsgálatok összefoglaló táblázata

Az eredmények alapján, amennyiben figyelembe vesszük az [58] előírásait szellőzőnyílásos védelmi rendszerek méretezéséhez, az alábbi összefüggéssel:

$$A = B \cdot \left(1 + C \cdot \lg \frac{L}{D}\right) \quad (44)$$

ahol a B konstans felvehető,

$$B = [3,264 \cdot 10^{-5} \cdot p_{max} \cdot K_{max} \cdot p_{red,max}^{-0,569} + 0,27 \cdot (p_{stat} - 0,1) \cdot p_{red,max}^{-0,5}] \cdot V^{0,753} \quad (45)$$

és a C konstans,

$$C = -4,305 \cdot \lg p_{red,max} + 0,758 \quad (46)$$

Amennyiben egy 2 m³-es tárolótartályban tároljuk az anyagokat, melynek L/D viszonya 1,5 és maximális redukált nyomása 1 bar. A tároló 0,1 bar nyitónyomású hasadófelülettel rendelkezik, megvizsgáltam, hogy mekkora felületet kellene, ha ebben az edényben pörkölt terméket tárolnánk. A (46)-os összefüggéssel meghatározva a szükséges lefűvőfelületet mind az alapanyagra, mind a pörkölt anyagra a 40. táblázatot vehetjük fel:

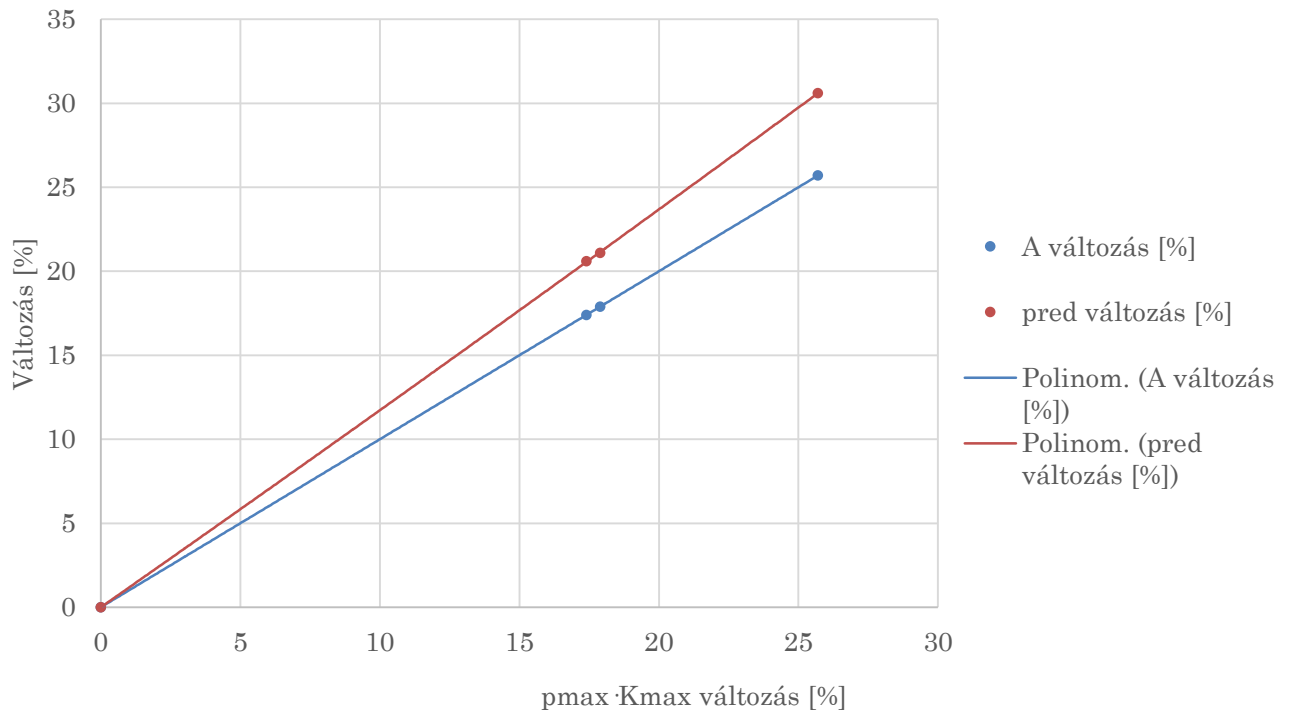
Anyagféleség	Szükséges lefűvőfelület [m ²]	Változás [%]
Búzaszalma	0,048	17,9
Pörkölt búzaszalma	0,056	
Repceszalma	0,073	17,4
Pörkölt repceszalma	0,086	
Szőlővenyige	0,072	25,7
Pörkölt szőlővenyige	0,09	

40. táblázat: A szükséges lefűvőfelületek változása az egyes termékekre

Ez azt jelenti, ha a tartály tulajdonságait változatlanul hagyunk (méretek, terhelhetőség) akkor a védelmi berendezés (hasadófelület) cseréje indokolttá válik. Abban az esetben, ha még a hasadópanelt is változatlanul hagyjuk, akkor a szerkezet megerősítését kell kivitelezni. Ebben az esetben a redukált nyomás maximális értékét az alábbi táblázat szerint kell megnövelni, ha a pörkölt termékek tárolására szeretnénk átállítani a berendezést. A táblázatban szereplő értékeket úgy kapjuk, hogy a (46)-os összefüggést a $p_{red,max}$ -ra kifejezzem.

Anyagféleség	Szükséges felület változás [%]	$p_{red,max}$ változás
Búzaszalma	17,9	21,1%
Pörkölt búzaszalma		
Repceszalma	17,4	20,6%
Pörkölt repceszalma		
Szőlővenyige	25,7	30,6%
Pörkölt szőlővenyige		

41. Táblázat: A felületnövekmény és a redukált nyomás összehasonlító táblázata



92. ábra: A felületnövekmény és a redukált nyomás összehasonlító táblázata

A 92. ábra alapján megállapítható, hogy adott veszélyesség növekmény védelmének biztosítása

- a veszélyesség növekménnyel azonos arányú lefúvófelület növeléssel, vagy
- a veszélyesség növekményéhez képest nagyobb arányú teherviselő képesség növeléssel

oldható meg. A mérnöki gyakorlatban ezek, vagy ezek kombinációjának alkalmazását optimalizációs számításokkal, költségelemzéssel lehet meghatározni.

10. Eredmények összefoglalása, gyakorlati hasznosíthatóság és a kutatási téma továbbfejlesztésének lehetőségei

Értekezésem témája a mezőgazdasági melléktermékek energiasűrűség-növelésének vizsgálata. Ezen anyagoknak nagy problémája energiasűrűségük alacsony értéke. Amennyiben energetikai célokra hasznosítani szeretnénk ezeket az anyagokat, úgy az energiasűrűségüket növelni kell. Ilyen módon a szállításuk nagyobb távolságról lehetővé válik, esetlegesen a közelben lévők gazdaságosabbá tehetők. A disszertációmban egy új eljárást dolgoztam ki a növelés lehetőségére. Az eljárás alkalmazásával gyártott új tüzelőanyagok tüzeléstani vizsgálatait végeztem el. A tüzelőanyagok magasabb fűtőértékekkel rendelkeznek, kevésbé hajlamosak visszanedvesedésre és magas az emisszivitási tényezőjük, viszont a hamulágyulási pontjuk csökken, illetve porrobbanási kockázatuk nagyobb.

Mivel ezeket a tulajdonságait ismerjük így fel tudunk készülni ezekre a potenciális veszélyekre nagyobb léptékű használat során.

A kutatás gyakorlati hasznosíthatóságát a bemutatott energiasűrítési technológia jelenti. Lehetőséget biztosít a lágymű- és fászfű növények energetikai célú hasznosíthatóságára.

A kutatás alatt sok olyan további kutatási lehetőségre felfigyeltem, mely az eljárás optimális működését befolyásolja. A témát a jövőben az alábbi irányokba szeretném továbbfejleszteni:

- A hőtartási idő alatt lezajló kémiai reakciók mélyebb megismerése.
- Ezen reakciók katalizátoros befolyásolása a gázkihozatal minőségének megváltoztatására.
- A leggyártott tüzelőanyagok hidrofób tulajdonságának vizsgálata.
- A gyártási folyamat energiaráfordítás és gazdasági szempontból történő optimalizálása.

Az Intézeti tanszék dolgozói résztvevők az Energiahíd című GINOP pályázat kidolgozásának, mely keretében szeretnénk megvizsgálni a településeken elszórtan képződő lehetséges energiaforrásokat. Többek között a növényi melléktermékek és hulladékok helyben történő hasznosítását, melynek része ennek a technológiának a használata.

A kutatómunkám eredményeként kapott elemzések egy későbbi prototípus létrehozásának alapjait adja meg. Az elkészülő berendezéseken lehetőségem nyílik nagy kapacitású mérések elvégzésére.

11. Summary

The topic of my dissertation is the investigation of increasing the energy density of the agricultural residues. The problem of the usage of these materials are the low energy densities. If these materials would be used as a fuel, than the energy density should be increased. In that way the transportaion of the agricultural residues can be easier and cheaper. During my research I have built-up a new process to increase the energy density of these materials. The new fuels' combustion properties were examined in the view of combustion technic. However the fuels have higher heating value, have a hidrofobic nature and the emissivity factor is high, the melting points of the ash is lower, and the risk of the dust explosibility is higher.

While right now we have these information about these new fuels we can prepare for these dangers and disadvantage during the industrial usage.

The practical advantage of the research the presented process for energy densitiy increasing. It provides the energetic usage of the herbaceus and woody biomass. During the research I have realized a few more oppportunity to improve the research. In the nearly future I would continue the research in the following:

- the deeper investigation of the reactions during the heat treatment.
- These reactions modification by different catalyst to modify the pirogas quality.
- More hidrofobicity examinations,
- and the energy demand and economical analysis of the process.

The colleagues of the department have involved the „Energiahíd” GINOP tender, and we would like to examine the rarely distributed possible energy sources. Amound these we would like to examine the agricultural residues usage locally.

The results of the dissertation is a foundation of a further prototype, which would designed and built the higher capacity examinations would be occurred.

12. Tézisek, tudományos eredmények

T1. Vákuumos pörkölési eljárást dolgoztam ki mezőgazdasági melléktermékek energiasűrítésére és meghatároztam az eljárás technológiai paramétereit (hőkezelési hőmérséklet, hőntartási idő). Kísérletekkel bizonyítottam, hogy a nyers biomasszának vákuumos pörkölés hatására, különböző hőntartási időktől függően megemelkedik a fűtőértéke [P5][P10], illetve megnő az energiasűrűsége. Numerikus módszert alkalmaztam a mérési eredmények közelítésére, amely alapján felírtam a fűtőérték meghatározására vonatkozó függvényt és meghatároztam a pörkölési együtthatókat a vizsgált alapanyagokra:

$$H = a + b \cdot \arctg(c_1 \cdot t) + c_2 \cdot e^{d \cdot t}$$

ahol,

a, b, c_1 , c_2 , d pörkölési együtthatók,

t: hőntartási idő [min].

T2. Kísérletekkel igazoltam, hogy a kidolgozott hőkezelési eljárás végrehajtása során a klór, a nátrium és a kálium, mint szennyező feldúsul a mezőgazdasági hulladékokban és melléktermékekben. [P12]

T3. Kísérletekkel igazoltam, hogy a kidolgozott hőkezelési eljárás végrehajtása során az elégetett pörkölt tüzelőanyag hamujának lágyulási hőmérséklete lecsökken az eredeti biomasszához képest.

T4. Kísérletekkel igazoltam, hogy a kidolgozott hőkezelési eljárás végrehajtása során a pörkölt biomassza porrobbanási veszélyessége megnő az alapanyagéhoz viszonyítva.

13. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek Dr. Siménfalvi Zoltánnak az elmúlt évek alatt nyújtott segítő munkáját és támogatását. Nélküle nem juthattam volna el eddig a kutatói pályámon.

Szeretnék köszönetet mondani néhai Dr. Lakatos Károlynak, az Ő áldozatos munkájának köszönhetem, hogy a kutatói pályára terelte a figyelmemet és elindított a doktori tevékenységemben.

Köszönetemet szeretném kifejezni Dr. Szepesi L. Gábornak és Venczel Gábornak a teljes kutatási időm alatt végzett munkájukért és támogatásukért. Nagy segítségemre voltak a méréseim kivitelezésében is.

Szeretném megköszönni Dr. Tolvaj Bélának az értékes segítségét és ösztönzését.

Szeretnék köszönetet mondani Szabó Szilárd Professor Úrnak a tanácsaiért és motiválásáért.

Továbbá köszönetem fejezem ki Szántó László kollégámnak a kísérletek gyakorlati megvalósítása során nyújtott segítsége miatt.

Köszönettel tartozom Ferenczi Tibornak az Öntészeti és Metallurgiai Intézet munkatársának, a kísérletek egy részéhez szükséges kemence rendelkezésemre állítása miatt. Továbbá köszönöm a derivatográfiai vizsgálatokban és a kiértékelésben nyújtott segítségét. Szeretném megköszönni a Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék fiatal kollégáinak, Márton Gábornak, Nagy Gábornak és Koós Tamásnak a kísérleteim végtermékeinek vizsgálatához nyújtott segítségéért.

Köszönöm Dr. Szemmelveisz Tamásné Tanárnőnek értékes észrevételeit és javaslatait.

Dr. Fegyverneki Sándor tanár úrnak is szeretném megköszönni a matematikai közelítésben nyújtott segítségét.

Szeretném kifejezni köszönetem minden kollégámnak a Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszéken, Bokros Istvánnak, Mikáczó Viktóriának, Dr. Joó Gyulának, Bodnár Istvánnak és nem utolsósorban Szlovacsekné Pekárik Ágikának a támogatásukért.

Továbbá köszönettel tartozom családomnak, Virágnak és Hanga Sárának végtelen türelmükért, ösztönzésükért és támogatásukért, mert nélkülük nem juthattam volna el eddig kutatói pályámon.

Köszönetemet szeretném kifejezni Édesanyámnak, Édesapámnak és testvéreimnek támogatásukért és segítségükért.

A kutatás a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Innovatív Gépészeti Tervezés és Technológiák Kiválósági Központ keretében valósult meg.

14. A kutatási témában megjelent publikációk

- P1. Szamosi Zoltán, Dr. Lakatos Károly: Is the agripellet renewable or not?, *Acta Metallurgica Slovaca*, Vol. 2. 2011, No. 1., pp. 207-212., Kosice, Slovakia, ISSN: 1335-1532
- P2. Szamosi Zoltán: Mezőgazdasági hulladékok vizsgálata, Miskolci Egyetem, Doktoranduszok Fóruma, Gépészmérnöki és Informatikai Kar Szekciókiadványa pp. 108-113., Miskolc, 2011. november 8.
- P3. Szamosi Zoltán, Dr. Lakatos Károly, Dr. Siménfalvi Zoltán: Az agripellet, mint megújuló energiaforrás vizsgálata, *GÉP Folyóirat*, 2012. 06. ISSN: 0016-8572
- P4. Szamosi Zoltán, Dr. Lakatos Károly, Dr. Siménfalvi Zoltán: Manufacturing of the agripellet: is it sustainable?, XXVI. MicroCAD Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolci Egyetem, 2012. március 29-30. ISBN:978-963-661-773-8
- P5. Szamosi Zoltán: Thermal and thermochemical treatments of agricultural residues, PhD hallgatók VIII. Nemzetközi Konferenciája, Miskolci Egyetem, 2012. augusztus 5-11. ISBN:978-963-661-994-7
- P6. Szamosi Zoltán, Dr. Lakatos Károly, Bereczkei Sándor: Repair of Kaplan turbine shaft sealing based on evaluation of hydraulic conditions, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 15, Part 7.
doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/15/7/072016>
- P7. Szamosi Zoltán: The torrefaction, *GÉP Folyóirat*, 2012. 10. pp. 45-48 ISSN: 0016-8572
- P8. Szamosi Zoltán, Dr. Siménfalvi Zoltán: Mezőgazdasági hulladékot feldolgozó pelletáló üzem létesítésének feltételei, *Multidiszciplináris tudományok*, 2. kötet (2012) 1 sz. pp. 115-120. ISSN 2062-9737
- P9. Szamosi Zoltán, Dr. Siménfalvi Zoltán: Mezőgazdasági hulladékok pörkölésére alkalmas berendezések és üzemi paraméterei, *GÉP Folyóirat*, 2013. 01.
- P10. Szamosi Zoltán, Dr. Harcsik Béla, Ferenczi Tibor: Búzaszalma pörkölése vákuum-indukciós kemencében, *GÉP Folyóirat*, 2013. 09. ISSN: 0016-8572
- P11. Szamosi Zoltán, Dr. Siménfalvi Zoltán: Torrefaction of the wheat straw, *International Scientific Conference on advances in mechanical engineering, ISCAME*, 10-11. 10. 2013 pp. 175-181. ISBN 978-963-473-751-3
- P12. Szamosi Zoltán, Dr. Siménfalvi Zoltán: Torrefaction of the wheat straw, XXVIII. MicroCAD Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolci Egyetem, 2014. április 9-11. ISBN 978-963-358-051-6
- P13. Szamosi Zoltán, Dr. Martí Rosas-Casals: Sustainability study of the torrefaction technology, *International Scientific Conference on advances in mechanical engineering*, 09-10. 10. 2014. ISBN 978-963-473-751-3

15. Irodalomjegyzék

- [1] P. Benkő, Hamuból műtrágya - Kálium-szulfát műtrágya és talajjavító szer hulladékhasznosításból, *Gazdasági Tükörcék Mag.* 10. (2010) 23.
- [2] M.J. Bell, F. Worrall, Charcoal addition to soils in NE England: A carbon sink with environmental co-benefits?, *Sci. Total Environ.* 409 (2011) 1704–1714. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.01.031.
- [3] T.P. Dr. Fenyvesi L., Ferencz Á., *A tűzipellet*, Cser kiadó, Budapest, 2008.
- [4] A.V. Bridgwater, Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, *Biomass and Bioenergy.* 38 (2012) 68–94. doi:10.1016/j.biombioe.2011.01.048.
- [5] R.K. Jalan, V.K. Srivastava, Studies on pyrolysis of a single biomass cylindrical pellet—kinetic and heat transfer effects, *Energy Convers. Manag.* (1999). doi:10.1016/S0196-8904(98)00099-5.
- [6] M. Halwachs, G. Kampichler, H. Hofbauer, Low temperature pyrolysis of agricultural residues – first results of a pilot plant, (2009) 5–10.
- [7] R. Zanzi, K. Sjström, E. Björnbo, Rapid high-temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor, *75* (1996) 545–550.
- [8] A.K. Sadhukhan, P. Gupta, R.K. Saha, Modelling and experimental studies on pyrolysis of biomass particles, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* (2008). doi:10.1016/j.jaap.2007.11.007.
- [9] N. Jendoubi, F. Broust, J.M. Commandre, G. Mauviel, M. Sardin, J. Lédé, Inorganics distribution in bio oils and char produced by biomass fast pyrolysis: The key role of aerosols, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* (2011). doi:10.1016/j.jaap.2011.04.007.
- [10] P.C.A. Bergman, Combined torrefaction and pelletisation The TOP process, (2005).
- [11] M.J. Prins, Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [12] A. Uslu, Pretreatment technologies and their effects on the international bioenergy supply chain, (2005).
- [13] P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Elsevier, Oxford, 2010.
- [14] D.W. van Krevelen, Coal, Typology - Physics - Chemistry - Constitution, 3rd ed., Elsevier Science, 1993.
- [15] J.J. Chew, V. Doshi, Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 4212–4222.
- [16] J.G. Speight, *The biofuels handbook*, 1th ed., Royal Society of Chemistry, 2011.

- [17] C. Wilèn, P. Jukola, T. Järvinen, K. Sipilä, F. Verhoeff, J. Kiel, Wood torrefaction – pilot tests and utilisation, 2013.
- [18] F. Verhoeff, a. Adell i Arnuelos, a. R. Boersma, J.R. Pels, J. Lensselink, J.H. a. Kiel, et al., Torrefaction Technology for the production of solid bioenergy carriers from biomass and waste, (2011) 82.
- [19] Z. Liu, G. Han, Production of solid fuel biochar from waste biomass by low temperature pyrolysis, *Fuel*. 158 (2015) 159–165. doi:10.1016/j.fuel.2015.05.032.
- [20] Isemin R, Kuzmin S, Konyakhin V, Milovanov O, Mikhalev A, Nikolopoulos N, et al., Development and testing of a pilot reactor for low-temperature pyrolysis (torrefaction) of straw pellets, (n.d.).
- [21] D.T. Ferro, V. Vigouroux, A. Grimm, R. Zanzi, Torrefaction of agricultural and forest residues, Cuba. 2004. (2004).
[http://www.techtp.com/recentpapers/Torrefaction of Ag & Forestry Residues.pdf](http://www.techtp.com/recentpapers/Torrefaction%20of%20Ag%20&%20Forestry%20Residues.pdf).
- [22] X. Wei, U. Schnell, K. Hein, Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilisation, *Fuel*. 84 (2005) 841–848.
doi:10.1016/j.fuel.2004.11.022.
- [23] J.M. Jones, L.I. Darvell, T.G. Bridgeman, M. Pourkashanian, a. Williams, An investigation of the thermal and catalytic behaviour of potassium in biomass combustion, *Proc. Combust. Inst.* 31 (2007) 1955–1963.
doi:10.1016/j.proci.2006.07.093.
- [24] H.P. Nielsen, F.J. Frandsen, K. Dam-Johansen, L.L. Baxter, The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers, *Prog. Energy Combust. Sci.* 26 (2000) 283–298. doi:10.1016/S0360-1285(00)00003-4.
- [25] Nagy Károly, Dr. Tóth Kálmán, Dr. Somogyi Antal, Deák Mihály, Barna László, Albert Péter, et al., Szilikátipari laboratóriumi vizsgálatok, , Műszaki Könyvkiadó, 1970.
- [26] A. Uslu, A. Faaij, P.C.A. Bergman, Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation, *Energy*. 33 (2008) 1206–1223.
- [27] G. Fábry Dr., Élelmiszer-ipari eljárások és berendezések, Mezőgazda Kiadó, 1995.
- [28] MSZ 24000-5 szabvány a Szenek laboratóriumi vizsgálatáról. Az égéshő meghatározása és a fűtőérték kiszámítása, 2. kiadás, 2003. szeptember, n.d.
- [29] MSZ EN 14774-1:2010 Szilárd bio-tüzelőanyagok. A nedvességtartalom meghatározása. Szárítószekrényes módszer., 2010.
- [30] K. Levenberg, Method for the solution of certain non-linear problems in least squares, *Q. Appl. Math.* 2 (1944) pp. 164–168.
- [31] D.W. Marquardt, An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters, *SIAM J.* 11 (1963) pp. 431–441.

- [32] M.R. Osborne, Nonlinear least squares—the Levenberg algorithm revisited, *J. Aust. Math. Soc.* (1976) pp. 343–357.
- [33] J. J. Moré, The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory, *Mathematics.* (1978) pp. 105–116.
- [34] R.H.H. Ibrahim, L.I. Darvell, J.M. Jones, A. Williams, Physicochemical characterisation of torrefied biomass, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 103 (2013) 21–30. doi:10.1016/j.jaap.2012.10.004.
- [35] T. Cao, Y., Li, G., Zhang, Z., Chen, L., Li, Y., Zhang, The specific heat of wheat, 2010. doi:10.5073/jka.2010.425.202.
- [36] H.K. Ahn, T.J. Sauer, T.L. Richard, T.D. Glanville, Determination of thermal properties of composting bulking materials., *Bioresour. Technol.* 100 (2009) 3974–81. doi:10.1016/j.biortech.2008.11.056.
- [37] K. Raznjevic, *Hőtechnikai táblázatok*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [38] R.M. Felder, R.W. Rousseau, *Elementary Principles of Chemical Processes*, 3rd update, R.R. Donnelly & Sons, 2005.
- [39] V. Strezov, T.J. Evans, eds., *Biomass Processing Technologies*, Taylor & Francis, 2014.
- [40] B.M. Petr A. Nikrityuk, ed., *Gasification Processes Modeling and Simulation*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, 2014.
- [41] J. Cheremisinoff, R.P. Nicholas, *Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists*, CRC Press, 2005.
- [42] N.M. Laurendeau, Heterogeneous kinetics of coal char gasification and combustion, *Prog. Energy Combust.* (1978) 221–270.
- [43] Y. Joshi, H. de Vries, T. Woudstra, W. de Jong, Torrefaction: Unit operation modelling and process simulation, *Appl. Therm. Eng.* 74 (2015) 83–88. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.12.059.
- [44] C. Pivovard, SYLAB IF2000G user’s manual, 2006.
- [45] ISO 540:1995 Solid mineral fuels, Determination of fusibility of ash, High-temperature tube method, 1995.
- [46] K. Szemmelveisz, I. Szűcs, Á.B. Palotás, L. Winkler, E.G. Eddings, Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass, *Fuel Process. Technol.* 90 (2009) 839–847. doi:10.1016/j.fuproc.2009.03.001.
- [47] B.. Jenkins, L.. Baxter, T.. Miles, T.. Miles, Combustion properties of biomass, *Fuel Process. Technol.* 54 (1998) 17–46. doi:10.1016/S0378-3820(97)00059-3.
- [48] J. Dodson, Wheat straw ash and its use as a silica source, (2011). <http://etheses.whiterose.ac.uk/1931/>.

- [49] MSZ EN 26184 -1 Robbanásvédelmi rendszerek – Robbanóképes por-levegő keverékek robbanási jelzőszámainak meghatározása, 1993.
- [50] MSZ EN 14034-1:2004+A1 Porfelhők legnagyobb robbanási nyomásának (p_{max}) meghatározása, 2004.
- [51] MSZ EN 14034-2:2006+A1 Porfelhők legnagyobb robbanásnyomás-növekedési sebességének (dp/dt) $_{max}$ meghatározása, 2006.
- [52] MSZ EN 14034-3:2006+A1 Porfelhők alsó robbanási határának (ARH-LEL) meghatározása, 2006.
- [53] MSZ EN 14034-4:2004+A1 Porfelhők oxigén-határkoncentrációjának (OHK-LOC) meghatározása, 2004.
- [54] G. Dr.Bozóki, Nyomástartó rendszerek túlnyomáshatárolása. Biztonsági szelepek, tárcsák, állványcsövek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [55] C. Christoph, R. Siwek, Kühner AG, KSEP 20-l apparatus user's manual, n.d.
- [56] J. Barton, ed., Dust Explosion Prevention and Protection, Institution of Chemical Engineers, 2002.
- [57] K.L. Cashdollar, Overview of dust explosibility characteristics, J. Loss Prev. Process Ind. 13 (2000) 183–199. doi:10.1016/S0950-4230(99)00039-X.
- [58] MSZ EN14491: Szellőzőnyílásos porrobbanás-védelmi rendszerek, 2006.
- [59] W.-H. Chen, P.-C. Kuo, A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry, Energy. 35 (2010) 2580–2586. doi:10.1016/j.energy.2010.02.054.
- [60] Zs. Fonyó Dr., G. Fábry Dr., Vegyipari Művelettani Alapismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998
- [61] T. Czibere Dr. Vezetékes hőátvitel, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1998
- [62] P. Benedek Dr., A. László Dr., A vegyészmérnöki tudomány alapjai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964
- [63] David JC MacKay, Sustainable Energy – Without the hot air, UIT, Cambridge, England, 2009.
- [64] Hazell P. and Pachauri R.K., Overview In Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges, International Food Policy Research Institute, 2020 Focus, No. 14 (2006) Washington DC
- [65] G. Somló: Vegyipari eljárások, Tankönyvkiadó, Budapest, 1974
- [66] B. Melissari: Ash related problems with high alkali biomass and its mitigation - Experimental evaluation, Montevideo

- [67] Q. Bach, K. Tran, Ø. Skreiberg, Accelerating wet torrefaction rate and ash removal by carbon dioxide addition, *Fuel Processing Technology*, 140(2015), 297–303, doi:10.1016/j.fuproc.2015.09.013