

Hulladék gumi vizsgálata energetikai célú felhasználás szempontjából

TDK dolgozat

Készítette: Szűcs Tibor
Konzulens: Dr. Szentannai Pál

2013.10.28.

Tartalom

1. Bevezetés.....	2
2. Analitikai vizsgálatok.....	3
2.1. Az 1-es minta TG vizsgálata	3
2.2. A 2-es minta TG vizsgálata	5
2.3. Összegzés.....	7
3. Egész szemcsék hevítésének és égésének vizsgálata	8
3.1. A kísérleti berendezés bemutatása.....	8
3.2. A kísérletek bemutatása és az eredmények	10
3.2.1. Az 1-es minta vizsgálata	11
3.2.2. A 2-es minta vizsgálata	16
3.2.3. A 3-as minta vizsgálata	22
4. Összegzés	23
5. Felhasznált források	25

1. Bevezetés

Manapság a polimer ipar sok támadást kap, mert jelentős mennyiségű hulladékot termel, melyek feldolgozására nem rendelkezünk megfelelő technológiákkal. Az egyetlen kivétel a használt autógumi, amit hatékonyan hasznosítanak a cementgyártásban. Ezen felül keletkezik még rengeteg selejt és gyártási hulladék az ipar minden területéről, amelyeket a háztartási hulladékhoz hasonlóan kezelünk. Ez a kutatási eredményeken is látható, a gumiabroncsokon kívül szinte egyáltalán nem áll rendelkezésre szakirodalom a témával kapcsolatban. Ez egy nagy hiányosság, hiszen magas szervesanyag-tartalmuk és fűtőértékük miatt az energetikai célú hasznosításuk nagyon ígéretes lehet [2]. Dolgozatomban be fogom mutatni, hogy nyílt szemléletmóddal és a megfelelő előkészületekkel e hulladékok értékes tüzelőanyagként való felhasználása egy olyan lehetőség, amit a jelenlegi bizonytalan energetikai helyzetben mindenképp érdemes megfontolni.

Állításaimat a szakirodalom hiánya miatt analitikai mérésekkel és tüzelési kísérletekkel fogom alátámasztani. Az analitikai elemzést az MTA Természettudományi Kutatóközpont végezte megrendelésre. Ennek a kiegészítésére és a gyakorlati alkalmazáshoz igazítására szolgáltak a Tanszéken fellelhető eszközökből összeállított, makroszkopikus vizsgálatokra is alkalmas kemencés tüzelési kísérletek. Három fő módszer került kidolgozásra: „lassú”, „gyors” és gravimetrikus kísérletek. Mindhárom a nagyteljesítményű FBC kazánok üzemeltetésével kapcsolatos folyamatokról ad információt, szakavatott szemek számára jól használható képet biztosítanak a tüzelőanyagok várható viselkedéséről.

A közlésre kerülő tételek között szerepelnek konkrét anyagvizsgálatok, melyek az Oroszlányi Erőmű megbízásából készültek és kulcsszerepet játszanak a jövőbeli beruházásaikban, de az igazi érték maga a kidolgozott vizsgálati módszerek sorozata, melyek szisztematikusan elvégezhetők bármilyen tüzelőanyagra költségmentesen, csak a Tanszéken hozzáférhető eszközök használatával (természetesen az analitikai vizsgálatok kivételével).

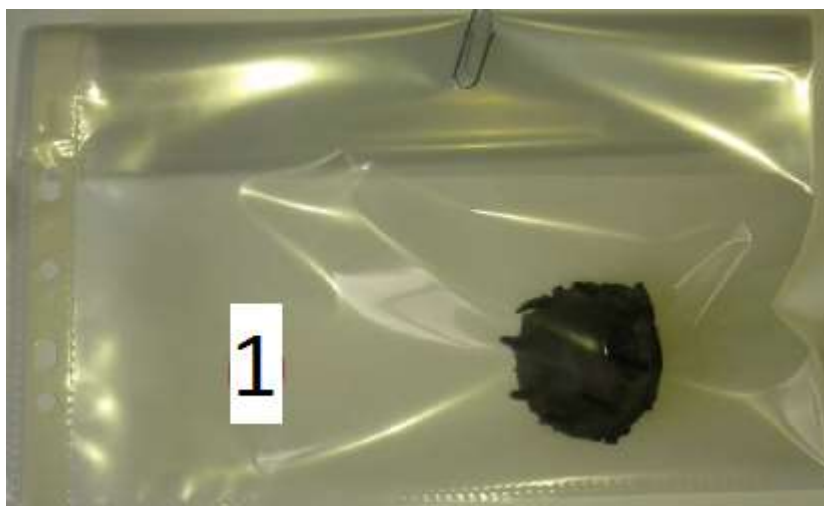
2. Analitikai vizsgálatok

Az alapul szolgáló MTA mérések részletes képet adtak a minták kémiai összetételéről és azok felszabadulásáról, de jelen vizsgálatok szempontjából csak a TG vizsgálatok voltak fontosak, ezért csak azok ismertetésére térek ki. A „TG” jelentése „thermogravimetry”, ami a mérési módszerre utal. Célja, hogy meghatározza a vizsgált minta tömegváltozását folyamatosan növekvő hőmérséklet hatására. Ez a hőmérsékletnövekedés tüzelőanyagoknál általánosan 40 °C/perc szokott lenni. Másik fontos szempont a mintát körülvevő légkör, ami inert (argon) vagy oxidatív (oxigént tartalmazó keverék) lehet. Szokás a tömegfogyási görbe hőmérséklet szerinti deriváltját is ábrázolni, ez a kiegészítés a DTG görbe [1].

A vizsgálatot az 1-es és a 2-es mintára végezték el (részletes bemutatásuk később) először inert atmoszférában, majd a maradékon megismételték a mérést oxidatív (5% oxigén) környezetben. Inert esetben a tömegcsökkenés oka jellemzően az illók kiválása, oxidatív esetben pedig a visszamaradt szilárd termék széntartalmának égése.

2.1. Az 1-es minta TG vizsgálata

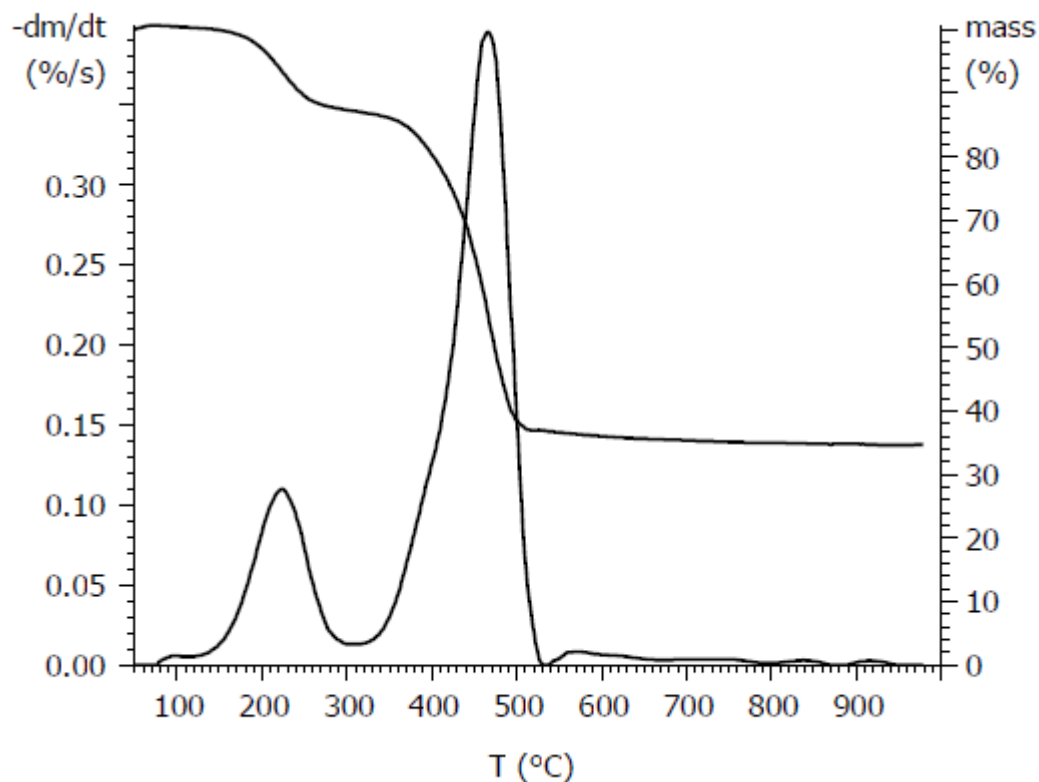
A laborvizsgálatra küldött minta (2-1. ábra) egésze természetesen nem került a mérőberendezésbe, ebből egy kb. 1 mg-os reprezentatív rész került leválasztásra [1].



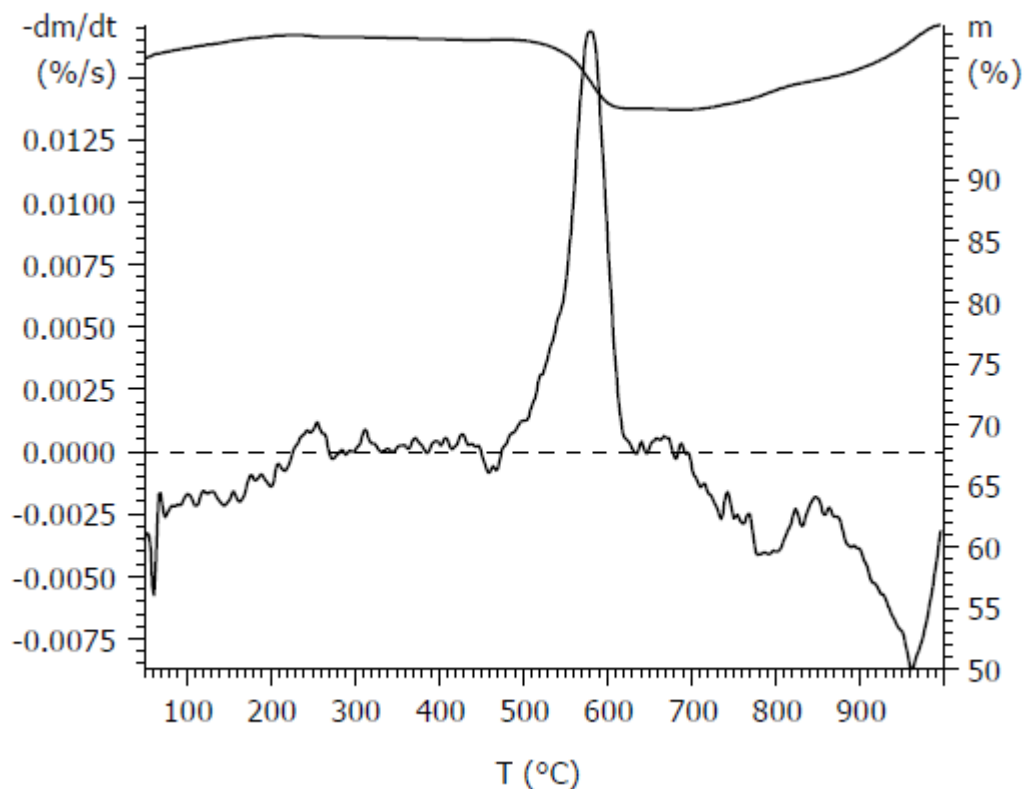
2-1. ábra: laborvizsgálatra küldött 1-es minta

Az inert vizsgálat eredményéből (2-2. ábra) szembetűnő, hogy az illó kiválás két lépcsőben zajlik. 200 °C körül egy kisebb hullámban 13%, majd 450 °C körül további 50% tömegcsökkenés tapasztalható. Az illókibocsátás kezdeti hőmérséklete kb. 150 °C, míg a véghőmérséklete kb. 550 °C [1].

Az oxidatív mérés alapján (2-3. ábra) kijelenthető, hogy az inert mérés után maradt minta csupán 6% tömegcsökkenést szenvedett el 600 °C körül, vagyis az illópárolgás után a szilárd szemcsék alig égtek tovább, jelentős részük nem éghető szervesetlen anyag. Ezek alapján a minta hamutartalma $(1-0,13-0,5)*0,94=0,35$, azaz 35%. A görbe második felén látható emelkedésnek nincs befolyása az eredményekre.



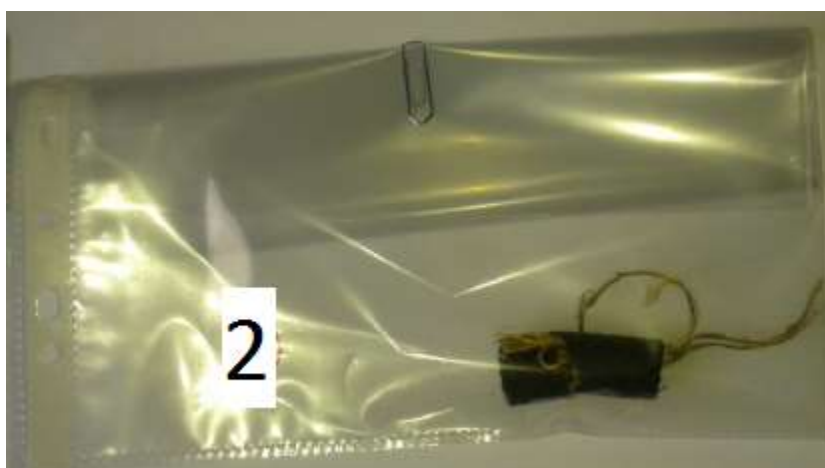
2-2. ábra: Az 1-es minta inert TG és DTG görbéje[1]



2-3. ábra: Az 1-es minta inert maradványának oxidatív TG és DTG görbéje[1]

2.2.A 2-es minta TG vizsgálata

A laborvizsgálatra küldött 2-es mintából (2-4. ábra) egy kis körgyűrű volt a vizsgálat tárgya, vagyis az amúgy több összetevőből álló test minden eleme a valósághoz igazodó arányban vett részt a mérésben.[1]

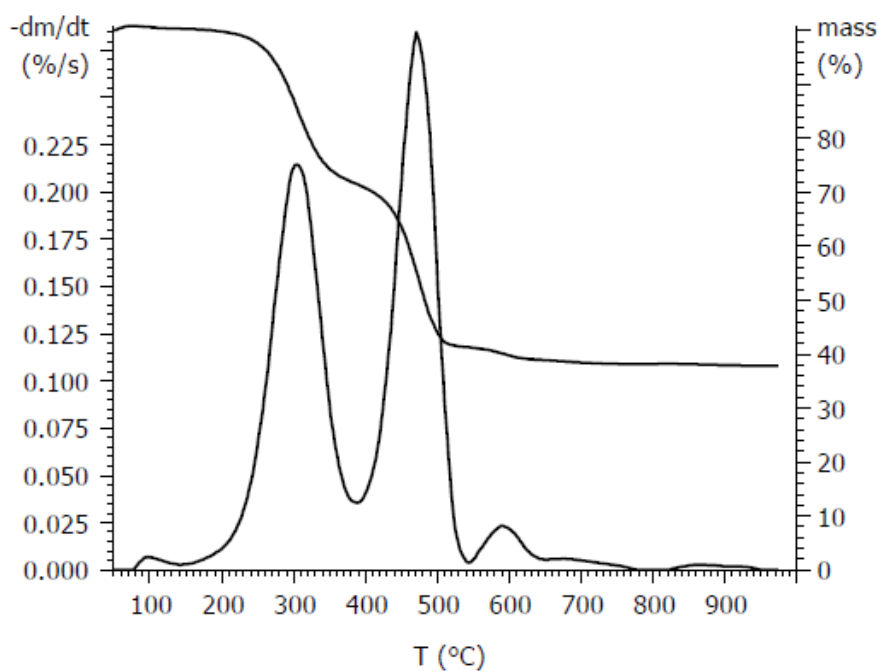


2-4. ábra: TG vizsgálatra küldött 2-es minta

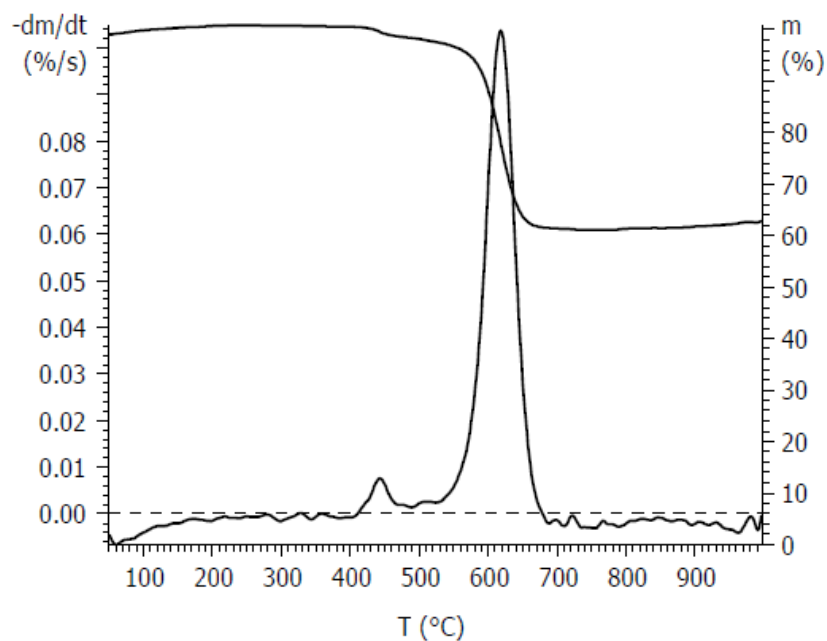
Az inert mérés görbéiből (2-5. ábra) látható, hogy a 2-es minta az 1-eshez hasonlóan két lépcsőben bocsájtja ki az illót. Az első hullámban, 300 °C körül kb. 29% tömegcsökkenés

mérhető, míg a második hullámban, 470 °C körül további 30%. E két lépcső már sokkal kiegyenlítettebb, mint az 1-es minta esetében. Az illókibocsátás kezdeti hőmérséklete 200 °C, véghőmérséklete pedig 550 °C.[1]

Az oxidatív mérés (2-6. ábra) azt mutatja, hogy az 1-es mintával ellentétben az illók távozása után is jelentős tömegcsökkenés (39%) tapasztalható a szilárd szemcséken 610 °C körül. Ezek alapján a minta hamutartalma $(1-0,29-0,3) \cdot 0,61 = 0,25$, azaz 25%.[1]



2-5. ábra: A 2-es minta TG és DTG görbéje[1]



2-6. ábra: A 2-es mintha oxidatív TG és DTG görbéje[1]

2.3.Összegzés

A fenti megállapítások az 1. táblázatban láthatóak összefoglalva.

1. táblázat: A TG vizsgálatok összefoglaló táblázata[1]

Minta	kezdeti tömeg, mg	Hőmérséklet-tartomány, °C	Tömegcsökkenés,%
1-es jelű minta (inert)	0,959	50-130	0,2
		130-310	12,9
		310-530	49,7
		530-1000	2,2
1-es jelű minta maradék (oxidatív)	0,335	450-650	5,7
2-es jelű minta (inert)	0,985	50-150	0
		150-390	28,9
		390-540	30,1
		540-1000	3,5
2-es jelű minta maradék (oxidatív)	0,378	400-700	39,2

Fontos kiemelni, hogy mindkét minta esetén a teljes égési folyamat lezajlik 700 °C alatt, vagyis tüzeléstechnikai szempontból nem indokolt magasabb tüztérhőmérséklet. Lényeges különbség viszont az, hogy az illókipárolgás után visszamaradt szilárd részecskék az 1-es minta esetében alig, a 2-esnél viszont jelentősnek mondható 39%-kal csökkent hevítés

hatására. Ebből hamutartalomra lehet következtetni, ami 35% az 1-es és 25% a 2-es mintára. Jelentős információ még az illópárolgás kezdeti és véghőmérséklete, ami 150 °C és 550 °C az 1-es, illetve 200 °C és 550 °C a 2-es minta esetében.[1]

3. Egész szemcsék hevítésének és égésének vizsgálata

A tüzelési kísérletek tervezése során egyrészt arra törekedtünk, hogy minél jobban közelítsük az FBC berendezésben lévő körülményeket, másrészt pedig hogy a vizsgált minták minden lényeges tulajdonságát részletesen feltérképezzük. Ezért új kérdések felmerülésekor több kísérletet is megismételtünk, újraterveztünk és a berendezést is többször átalakítottuk.

A mérések kiértékelése során figyelemmel kísértük az MTA anyagban szereplő adatokat, de mivel ezek a kísérletek teljesen másmilyen felfogásban készültek, a különböző eredmények nem hivatottak felülmúlni egymást, sokkal inkább egymást kiegészítve kezelendők.

3.1.A kísérleti berendezés bemutatása.

A tüzelési kísérletek központi eleme egy kemence volt, mely 1200 °C-os véghőmérsékletével és kellő nagyságú belső terével ideális eszköze lett a vizsgálatoknak. A kemencét a 3-1. ábra szerint szereltük fel egy állvánnyal, mely szerepe egyrészt a minta stabil tartása, másrészt pedig egy digitális mérleg folyamatos nyomásával a makroszkopikus gravimetrikus vizsgálatok elvégzése.



3-1. ábra: Az összeállított kísérleti berendezés

Az állvány az 3-2. ábra szerinti két fejjel szerelhető fel. Amikor csak lehetett, a hegyes végűt használtuk, mivel azzal közelíthető a legjobban a fluidizációs környezet, hiszen a minta minden oldala szabadon érintkezik a levegővel. A kanalas megoldásra olyan esetekben volt szükség, amikor nem engedhettük meg, hogy az égés közben a minta szétessen, vagy az túl apró részekből állt.



3-2. ábra: Az állványra szerelhető fejek

Továbbá a berendezést felszereltük magashőmérsékletű termoelemekkel, amit mindig úgy helyeztünk el, hogy a minta legjellemzőbb hőmérsékletét mutassa.

3.2. A kísérletek bemutatása és az eredmények

A minták hevítéses vizsgálatára három eljárást dolgoztunk ki. Az első, ún. „lassú” kísérletek során a mintát az alacsony hőmérsékletű kemencébe helyeztük, és folyamatos hevítés mellett 50 °C-onként megvizsgáltuk a változásokat. Ez a vizsgálat a minta adott hőmérsékleteken való hosszabb tartózkodására ad támpontokat. Erre azért van szükség, mert a gumi az üzem során jelentős időt tölthet magas, de a tűztér hőmérsékleténél jóval alacsonyabb hőmérsékletű pontokon, például az adagolórendszerben. Az MTA jelentésben is kiemelték az alacsony illó kibocsátási és égési hőmérsékleteket, ezért mindenképp meg kellett vizsgálnunk üzemihez közeli körülmények között is. További fontos kérdés volt a minta illó-párolgás közbeni ridegedése és porladása, ami már az első tájékoztató jellegű égetések során felmerült.

A második, ún. „gyors” kísérleteknél nem korlátoztuk a minta felmelegedését, mint az előzőnél, rögtön magas (700 °C körüli) hőmérsékletű kemencébe helyeztük, így az égési folyamat akadály nélkül lejátsható. Ezzel a minta tűztérbe való kerülését modelleztük, természetes a fluidizációs körülmények nélkül. Jól használható eredményeket kaptunk az illó kipárolgásáról, begyulladásáról, továbbá a koksztól és végtermékekről, amik az eddigi

analitikai eredményekkel ellentétben már makroszkopikus mintákra vonatkoznak, olyan állapotban, ahogy a tüzelés során is lesznek.

A harmadik pedig a termogravimetrikus mérés, ami az MTA által végzett TG vizsgálathoz hasonlóan a tömegcsökkenést vizsgálja, de ebben az esetben a hőmérséklet egyáltalán nincs lekorlátozva, így a már említett mérlegre irányított kamerával rögzíthetjük az égés közbeni tömegcsökkenést az idő függvényében. Ezáltal jó közelítő eredményt kaphatunk arról, hogy mennyi időre van szükség a tüztérben az illók teljes távozásához és a szénszemcsék kiégéséhez. A mérés természetesen a kezdetektől oxigéndús levegőben történik, így az illók begyulladnak, ezzel is közelítve a valós körülményeket. A mérleg pontos működéséhez szükség a terhelés szétosztására, így a 3-1. ábra összeállítása még ki lett egészítve egy a mérlegre helyezett kartondobozzal. E mérések kemencehőmérséklete 500 °C körül lett beállítva, ami kitolta az illók begyulladását a „gyors” kísérletekhez képest, de nem torzította a minta égési hőmérsékletét, így arról is pontos képet kaphattunk.

Fontos megjegyezni, hogy a minták összetétele változatos, ezért az összes közölt érték kerekítéssel került megadásra, hogy a teljes mintamennyiségre jellemző lehessen. Épp emiatt tapasztalható néhány eltérés az analitikai mérésekhez képest, amik csak egy-egy mintára vonatkoztak. Az illó párolgásához és begyulladásához kapcsolódó hőmérsékletek is vizsgálati típustól függően változhatnak. Ezt nem hibának kell tekinteni, hiszen nem elemi anyagvizsgálatokról van szó, ahol csak az összetétel számít. Sokkal inkább arra mutat rá, hogy a minták különböző üzemállapotokban a vártnál is jelentősebben eltérően viselkedhetnek.

3.2.1. Az 1-es minta vizsgálata

Az 1-es minta változatos formájú gyártási hulladékokat tartalmazott, melyeket a jobb kezelhetőség érdekében apróbb darabokra vágtunk, amit a 3-3. ábra mutat.



3-3. ábra: Az 1-es minta, aprítás után

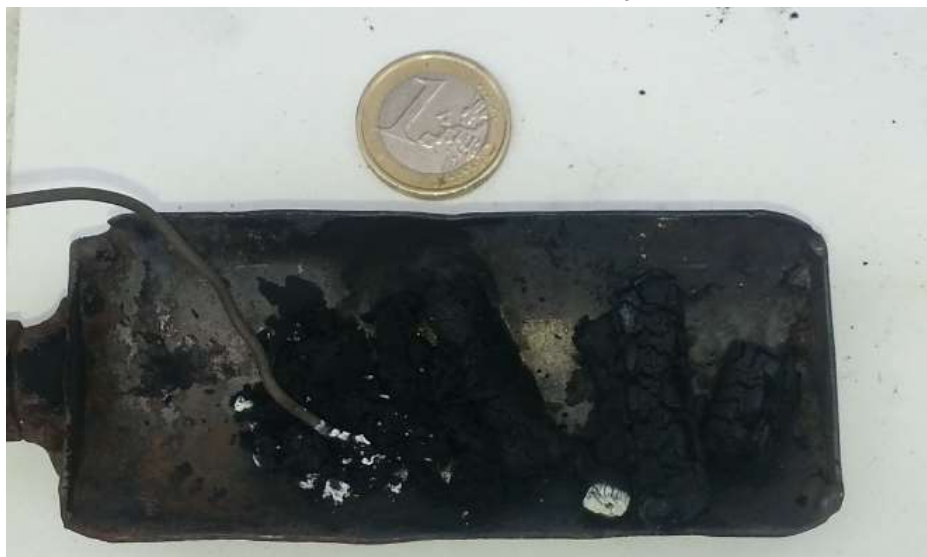
A mérések során az illók kibocsátása 170 °C-on kezdődött és 340 °C-on lett a legintenzívebb, ami után nem sokkal, 370 °C-on be is gyulladt. Gyors kísérleteknél már jóval hamarabb, 280 °C-os jellemző mintahőmérsékletnél égni kezdett.

A minta lassú melegítés során érdekesen viselkedett. A legtöbb elem 340 °C körül, már az intenzív illókibocsátás során porózussá szilárdult és sokszor a begyulladás teljesen elmaradt. Néhány típus viszont már jóval korábban, 200 °C körül hólyagosodni és olvadni kezdett, és ragadóssá vált, ami komoly problémát okozhat tüztér előtti, magas hőmérsékletű szakaszokon. Az olvadásra hajlamos mintát a 3-4. ábra mutatja. A minta származási helyén tett látogatás során azt a magyarázatot kaptuk, hogy ez utóbbi viselkedés az olyan gumikra jellemző, amiket még a teljes vulkanizálás előtt kivontak a gyártási folyamatból. Ez a jelenség a tüztérben már nem okozna problémát, hiszen magas hőmérsékleten nem lenne ideje megolvadni, ahogy a gyors kísérletekben is tapasztaltuk. A típus a kapott minták körülbelül 10%-át teszi ki.

A másik említett tulajdonság, az illókiválás során tapasztalt rideg szilárdulás is mindenképp odafigyelést igényel tüzelés során, mivel ezt a könnyen széteső szilárd vázat a fluidágy le fogja bontani, és a letöredező finom részecskék kirepülhetnek a tüztérből, még mielőtt teljesen kiéghetnének, hiszen tömegük jóval kisebb, mint az ágy átlagos szemcséi. A szétporladt mintát a 3-5. ábra mutatja. További vizsgálatok során bebizonyosodott, hogy ez a váz megegyezik az illó elégeése után, de a koks izzása előtt kapott termékkel.



3-4. ábra: Az olvadásnak indult minta eredeti alakja és kísérlet közbeni képe



3-5. ábra: Az illók távozása után maradt porózus váz

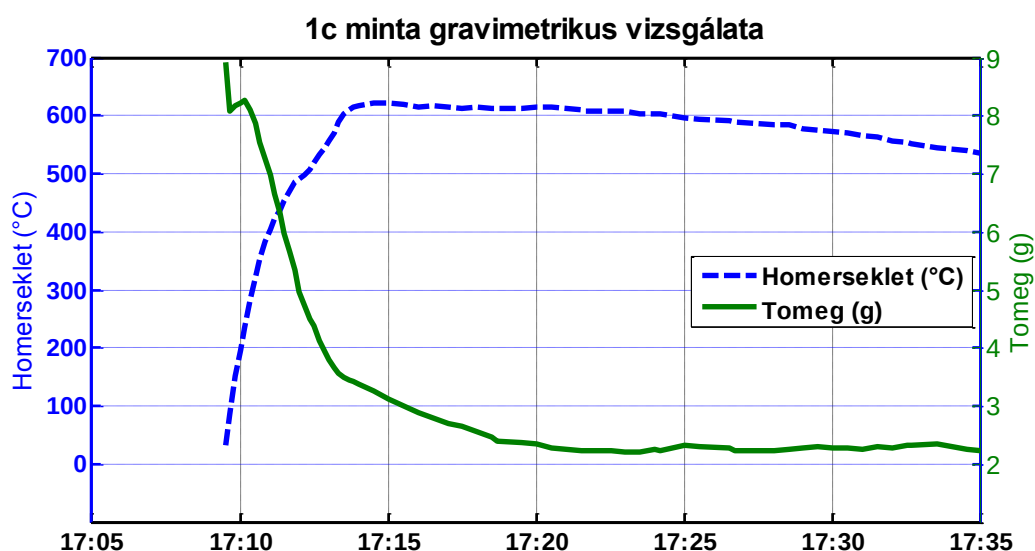
A 2. táblázatban láthatók egy „lassú” vizsgálat során tapasztaltak összefoglalása. A mintában szerepel a már említett ragadós elem is.

2. táblázat: Az 1-es minta vizsgálata "lassú" kísérlettel

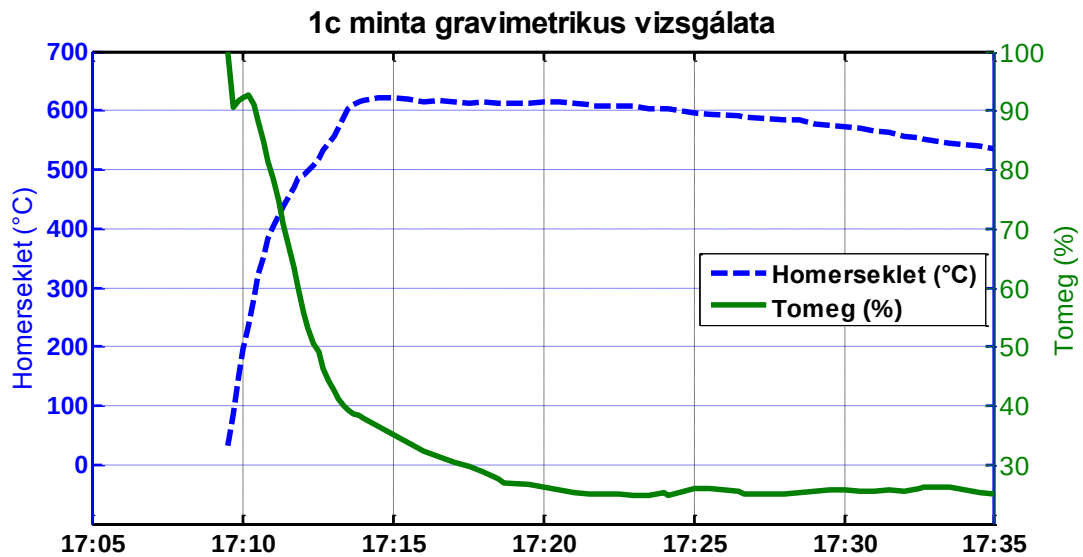
Hőmérséklet	Megfigyelés	Szemléltető kép
	Kezdeti állapot	
200 °C	Illó kiválás folyamatban, egy minta olvadásnak indult	
355 °C	illó kiválás a legintenzívebb, a többi minta elkezdett szilárdulni, visszatétel után lángolni kezd	
620 °C	Láng elaludt, a teljes minta kokszerű porrá vált	

A makroszkopikus gravimetrikus vizsgálat görbéin (3-6. ábra, 3-7. ábra) látható, hogy a mérés kezdetekor a magas (510 °C) kezdeti hőmérséklet hatására rögtön megkezdődött az intenzív melegedés és az illó kiválás. A tömegváltozás kezdeti ingadozása abból fakad, hogy a mérlegnek időbe telt stabil állapotba kerülnie a minta ráhelyezése után. A korábbi vizsgálatoktól eltérően az illók 500 °C körül gyulladtak be, ami a hőmérsékletgörbe meredekségének megváltozásán is látható. Ezt a már korábban leírt alacsonyabb

kemencehőmérséklet okozta. Az időskála mutatja, hogy az illók távozása kb. 4 percig tartott és 60% tömegcsökkenéssel járt. Ezalatt kb. 4 percig tartott, amíg a minta felvette a maximális hőmérsékletét. Ezután mérhető változás még további 6 percig történt, ami még további 13% fogyást eredményezett. Ekkor a minta már elérte a maximális hőmérsékletét, és csak parázssal égett. A továbbiakban már egyáltalán nem történt tömegváltozás, és a hőmérséklet is lassan csökkenni kezdett. A korábbiakban meghatározott analitikai görbékhez képest ez a 73%-os tömegváltozás nagyobb, ami a minta anyagi összetételének változatossága magyarázhat. Az 1-es minta gravimetrikus mérését egy másik, apróra őrléssel homogenizált mintavételből végeztem. A gyakorlati alkalmazás szempontjából a két érték átlagát érdemes mérvado értékeknek tekinteni. További hasznos információ az, hogy a tömegcsökkenés jelentős része az illóképződés során lezajlik, vagyis a teljes kiégés nem tart tovább 10 percnél.



3-6. ábra: Az 1-es minta makroszkopikus gravimetrikus görbéi



3-7. ábra: Az 1-es minta makroszkopikus gravimetrikus görbéi

3.2.2. A 2-es minta vizsgálata

A 2-es minta túlnyomó részt víz- és benzincsőveket tartalmazott, melyeket a 3-8. ábra mutatja.



3-8. ábra: A 2-es minta elemei

Jellegzetes elemei a gumi test, a belső szövetváz, valamint néhány minta tartalmazott egy külső polimer hálót, továbbá egy legbelső fóliászerű réteget. Vizsgálataink minden elemre részletesen kiterjedtek.

A gumi testre 250 °C körüli rideg szilárdulással járó illó-kipárolgás és 310 °C körüli gyulladás volt jellemző, vagyis az illó később szabadul fel, mint az 1-es mintánál, de a gyulladási hőmérséklete alacsonyabb. Kellően lassú melegítés esetén az 1-es mintához hasonlóan (ráadásul szinte minden „lassú” kísérlet esetén) megfigyelhető volt, hogy az illó begyulladása elmaradt és csak a porózus kokszt maradt hátra, ahogy a 3-9. ábra is mutatja. Ez a jelenség az 1-es mintánál leírtak megfelelően odafigyelést igényel fluid tüzelés esetén.



3-9. ábra: Az illók távozása után visszamaradó porózus váz

A szövetszál (amely minden egyes mintában megtalálható volt) azért érdekelt ki a figyelmünket, mert a gyors és lassú vizsgálatok során sohasem égett el a gumi testtel együtt (3-10. ábra), vagyis joggal feltételezhattunk jóval magasabb (akár a tervezett tűztéri hőmérsékletnél is magasabb) gyulladási hőmérsékletet. Megvizsgáltunk emiatt néhány, a gumitól különválasztott szövet darabkát is úgy, hogy a szokásos módon behelyeztük az ismert hőmérsékletű kemencébe (3-11. ábra). Azt tapasztaltuk, hogy 500 °C-on izzani kezd, majd zsugorodva, porszerű állapotban le hull a tartóról. A vizsgálatok, valamint a származási telephelyen tett látogatás tanulságai szerint kevlár a szál anyaga. A tüzelőanyagban jelenlévő bármely nem éghető komponens általában külön nehézséget okoz fluidizációs kazánok üzemeltetése szempontjából, ez esetben azonban e háló laza szövése miatt is nagyon csekély a részaránya, és emellett nem ragadós, porszerű anyaggá olvad, vagyis nagy valószínűséggel nem fog külön problémát okozni.



3-10. ábra: A szövetszál a gumi test eltávolítása után



3-11. ábra: A szövetzál vizsgálata

A jóval kevesebb mintán megtalálható külső polimer háló megfelelő tulajdonságokat mutatott. 200 °C körül meggyulladt és kis lánggal, zsugorodva elégett, még a gumi test illó-kigőzölése előtt.

Az egyetlen olvadásra hajlamos elem a minták körülbelül harmadában megtalálható, nehezen hozzáférhető belső fólia réteg volt, ami a 3-8. ábra jobb oldali képén is megtalálható. Több „lassú” kísérlet során tapasztaltuk, hogy a megszilárdult gumi test lefejtése után a még nem teljesen elégett fólia ráragadt a rúdra. Ez azért történhetett meg, mert a legbelső rétegben volt a leglassabb a hőmérsékletnövekedés és a legkevesebb oxigén, ezért ennek a résznek nem volt esélye begyulladni. A tényleges alkalmazás során ez nem fog gondot okozni, mivel amíg a fólia a csövek belsejében tartózkodik nem fog hozzáragadni a kazán felületeihez, ha pedig a fluidágy lekoptatja róla a megszilárdult gumivázat, a magas tüztérhőmérsékleten már be fog gyulladni.

A mintával kapcsolatban további aggodalomra adhat okot a válogatás minősége. Több zsáknyi mintát is kaptunk, amik közül az egyik jelentős mennyiségben tartalmazott el nem távolított fém bilincseket (3-12. ábra), amik problémát okozhatnak a fluid ágyban. További probléma, hogy e bilincsek közül néhány nem mágnesezhető, valószínűleg alumíniumból készültek, így a tüzelőanyag adagolásnál használt mágnesek se szelektálják ki őket. Fontos kiemelni, hogy ez csak egy zsák tartalmára volt igaz, a többi egyáltalán nem tartalmazott fém szennyezőket, és a méretük is sokkal homogénebb volt. A jelenség mindenképp odafigyelést igényel, de a szállítóval gond nélkül tisztázható.

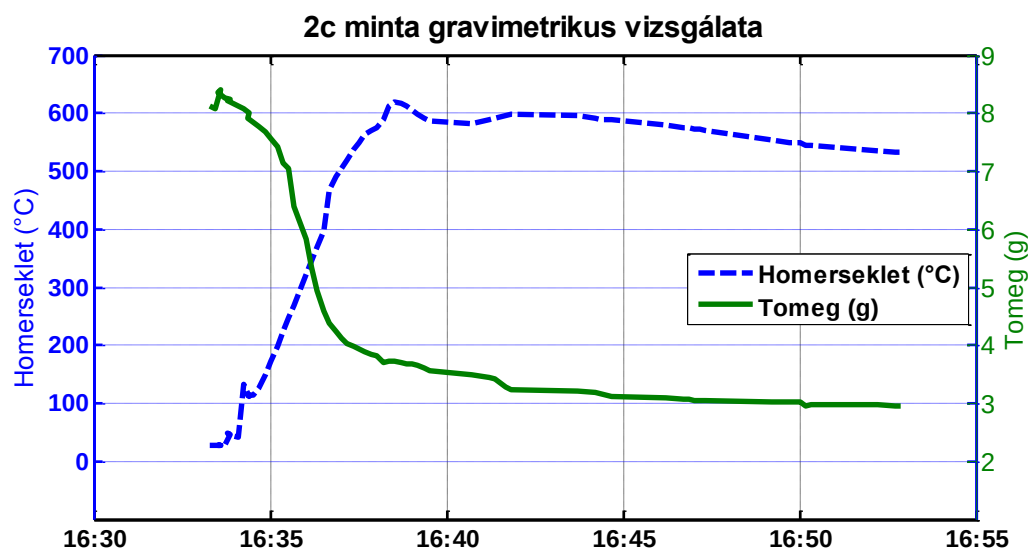


3-12. ábra: Az 1-es minta fémtartalma, bekarikázva a nem mágnesezhető elemek
A 3. táblázatban láthatóak a 2-es minta „lassú” vizsgálata során tapasztalt összefoglalása. A vizsgált gumi a már említett külső hálóval is rendelkezett.

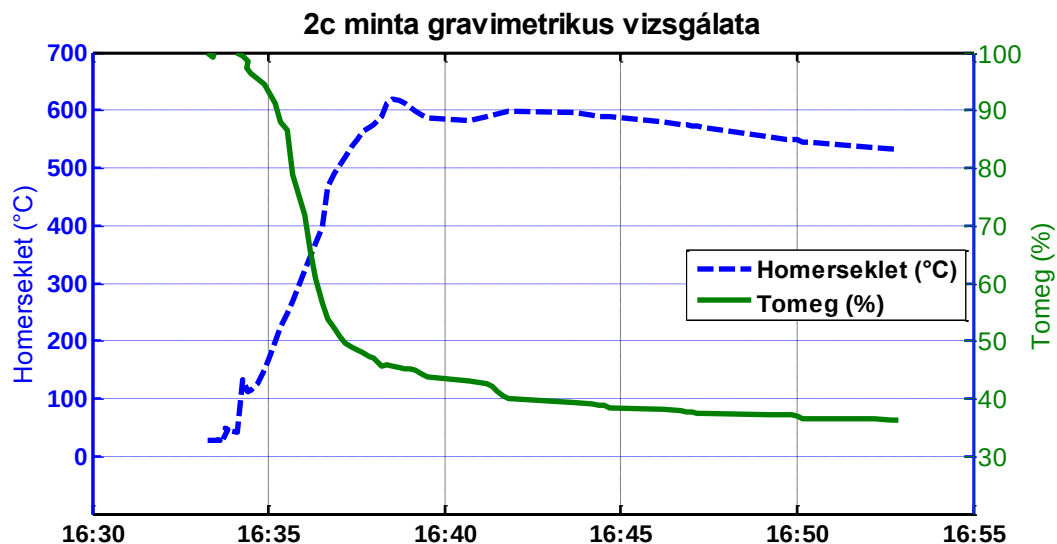
3. táblázat: A 2-es minta "lassú" vizsgálata során tapasztaltak

Hőmérséklet	Megfigyelés	Szemléltető kép
	Kezdeti állapot	
200 °C	A külső háló égni kezd	
250 °C	A teljes háló elégett, illókiválás kezdete	
325 °C	A minta lángolni kezdett, a gumi test megszilárdult	
600 °C	Lángok kialudtak	

A makroszkopikus gravimetrikus mérés (3-13. ábra, 3-14. ábra) során a minta az 1-eshez hasonlóan viselkedett. A kezdeti kemencehőmérséklet ez esetben 550 °C volt. A minta hőmérséklete ismét 600 °C-ig emelkedett, aminek az elérése során a tömegcsökkenés jelentős része, vagyis az illó kiválás lejátszódott. Ez kb. 5 percig tartott, ami során 55% tömegcsökkenés történt. Az illó itt 400 °C körül gyulladt be, ami látszik is a hőmérsékletgörbe meredekségének megváltozásán. A lángok kialvása után, a hőmérséklet lassú csökkenése mellett további 12% tömegcsökkenés volt tapasztalható, amely a mérés során fokozatosan játszódott le. Az analitikai méréshez képest a mért fogyás kisebb volt, ami a hengeres minta alakja miatt történt. A méréshez a korábban bemutatott lapátszerű állványt használtuk, ami miatt a minta alján nem játszódhatott le a teljes égési folyamat. Fontos tapasztalat, hogy bár a tömegcsökkenés jelentős része ez esetben is kb. 10 perc alatt lezajlott, de a szilárd részecskék égése kisebb intenzitással folyamatosan fennmaradt a mérésre kijelölt 20 perc alatt, ami további 10% tömegcsökkenést jelentett. Ez alapján a várható tartózkodási ideje nagyobb, mint az 1-es mintáé.



3-13. ábra: A 2-es minta makroszkopikus gravimetrikus görbéje



3-14. ábra: A 2-es minta makroszkopikus gravimetrikus görbéje

3.2.3. A 3-as minta vizsgálata

Az utólag érkezett 3-as minta homogénnek mondható német származású aprított autógumiból állt, mely jelentős mértékű szövetszálat is tartalmazott. A mintát a 3-15. ábra mutatja.



3-15. ábra: A 3-as minta

A gumi test esetén az illók kipárolgását 170 °C-tól tapasztaltuk, ami 280 °C-nál lett a legintenzívebb. 330 °C-nál enyhén parázslani kezdett, majd nem sokkal utána, 340 °C-on begyulladt. A korábbi mintákkal ellentétben, a lánggal égés során intenzív pernye-képződést tapasztaltunk, ami komolyan korlátozhatja a minta alkalmazhatóságát. Továbbá, az illókiválás intenzívvé válásával egy időben a minták olvadásnak indultak és ragadóssá váltak, ahogy a 3-16. ábra is mutatja. Az első képen az látható, ahogy a kemencéből frissen kivett, de még be nem gyulladt minta nyomot hagy a papíron, míg a másodikon az olvadásnak indult

felszínen kialakult buborékok láthatók, amik égetés során hanghatás kíséretében többször is kipukkadtak.

Az illók elégeése után hátramaradt koks-váz az előző mintáknál tapasztalthoz hasonló porózus tulajdonságokat mutatott, ezért az ott leírt túl korai kihordási probléma ennél a mintánál is fennáll.

A szövetszál hasonló az 1-es mintánál tapasztalthoz, de az égési tulajdonságai kedvezőbbek. A gumi-illó kigőzölgésének kezdeténél tapasztaltuk, hogy láng nélkül, parázzsal égni kezdett, ami teljesen be is fejeződött 280 °C-nál, vagyis nem fog alkalmazási problémát okozni.



3-16. ábra: A 3-as minta ragadóssá válása

A tapasztalatok alapján a 3-as minta nem mutatott kedvező tulajdonságokat energetikai alkalmazáshoz. Az intenzív pernyeképződés kibocsátási problémákat okozhat, az olvadás pedig a berendezéseket veszélyeztetheti. A tapasztalatok tükrében a minta elvetése mellett döntöttünk, több vizsgálatot nem végeztünk rajta.

4. Összegzés

A kapott mintákról általánosságban megállapítható, hogy energetikai alkalmazásuk lehetséges, de néhány problémát mindenképp mérlegelni kell.

A minták 200-300 °C-os tartományban elővigyázatosan kezelendők, mert minden minta tartalmaz olvadásra és ragadásra hajlamos elemeket, de az 1-es és a 2-es csak kis mértékben. Ebben a tartományban megkezdődik már az illók kigőzölgése is, ami hosszabb idejű tárolás esetén energiaveszteséget jelent és biztonságvédelmi kockázatot is hordoz.

További problémát okozhat a fluidágyban való aprózódás, ami minden mintára jellemző volt. Ez nagy légsebességnél a szemcsék kiégés előtti kihordásához vezethet, ami egyrészt energia-veszteséget okoz, másrészt a szilárd szennyező kibocsátást is növeli.

A 3-as mintával kapcsolatban mindenképp fontos jelenség az égés során keletkező jelentős mennyiségű pernye, amely ráragadhat a tűztér berendezéseire és a szilárd szennyező kibocsájtást is növeli.

Minden jelentős alkalmazhatóságot érintő tapasztalat összefoglalva megtalálható a 4. táblázatban.

4. táblázat: A tapasztalok összefoglalása

	1-es számú minta	2-es számú minta	3-as számú minta
Megnevezés	ipari hulladék	víz- és benzincsővek	aprított autógumi
Illó kiválás	170-340 °C	250-300 °C	170-330 °C
Illó begyulladás	370 °C	310 °C	340 °C
Maximális hőmérséklet	610 °C	610 °C	700 °C alatt
Gumi test viselkedése	szilárdulás és porrá esés néha ragadóssá válás	szilárdulás és porrá esés	szilárdulás és porrá esés fokozott ragadósság
Egyéb összetevők	nincs	belső fólia, szövetszál, külső háló, fém bilincsek	szövetszál, jelentős koromtartalom
Egyéb összetevők hatása	nem okoz problémát	a bilincsek jelenléte problémát okozhat, kiszűrése indokolt	intenzív koromkibocsátás
Kiegészi idő	10 perc tökéletes kiegész	10 perc intenzív, utána határozatlan idejű lassú égés	nem történt mérés
Bírálat	Megfelelő előkészületek mellett energetikailag hasznosítható	Megfelelő előkészületek mellett energetikailag hasznosítható	Energetikai használata nem javasolt

5. Felhasznált források

[1].MTA jelentés

[2].N. *Antoniou*, A.Zabaniotou (Biomass and Waste group, Department of Chemical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece): Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 (2013), p539-558.