Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Energia- és Minőségügyi Intézet
Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék

Műanyag hulladékok égési tulajdonságainak vizsgálata

TDK

Szerzők: Buzás Bettina
Tóth Judit Zsuzsanna

anyagmérnök MSc hallgató

Konzulensek: Dr. Póliska Csaba
Mentes Dóra
Kovács Árpád

2020.

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés 2

2 A hulladékok keletkezése, fajtái, kezelésük, égetésük 4

2.1 Műanyagok károsanyag-kibocsátása égetés során 8

3 Anyagok és módszerek 9

3.1 Vizsgálati anyagok 9

3.1.1 Polipropilén 10
3.1.2 Polietilén 10
3.1.3 Polietilén-tereftalát 11

3.2 Vizsgálati módszerek 12

3.2.1 Az égéshő meghatározása 12
3.2.2 Lágyulási és olvadási paraméterek meghatározása hevítőmikroszkóppal 13
3.2.3 Termoanalitikai vizsgálatok 15
3.2.4 Csőkemencében végzett égetési kísérletek 17
3.2.5 Elektronmikroszkópos vizsgálat 18

4 Eredmények 20

4.1 Kísérleti anyagok fizikai és kémiai tulajdonságai 20

4.1.1 A vizsgált műanyagok tüzeléstechnikai paraméterei 20
4.1.2 Alapanyagok termoanalitikai vizsgálata 20

4.2 Füstgáz komponens-koncentrációk alakulása műanyagok égése közben 26

4.3 Égési levegő térfogatáram változtatásának hatása a füstgáz komponens koncentrációkra 28

4.4 Tűztér hőmérséklet változtatásának hatása a füstgáz komponens koncentrációkra 30

4.5 Füstgáz szilárd komponenseinek pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata 33

5 Összegzés 36

Köszönetnyílvánítás 38

Irodalomjegyzék 39

1 Bevezetés

A Föld lakossága az elmúlt évtizedek alatt hatalmas ütemben növekedett. Csupán a 20. század alatt az 1,6 milliárdról 6 milliárdra duzzadt és napjainkra az 1970-es évek óta a népesség száma közel megduplázódott. A jelenlegi növekedés 1,05%, ami nagyjából 81 millió embert jelent évente. A statisztikai adatok szerint, amennyiben a jelenlegi tendenciák nem változnak, akkor a világ népessége 2057-re elérheti a 10 milliárd főt [1].

Az emberiség számának ilyen extrém módon való növekedése több kellemetlen mellékhatással is jár: a levegő-víz és talajszennyezés világszerte rengeteg problémát okoz, ami nem csak az emberre nézve káros. Rengetegen élnek megbízható, stabil víz- illetve élelemforrás nélkül, amely azzal magyarázható, hogy az adott régión belül túl nagy a népsűrűség, amelyet az infrastruktúra (ha egyáltalán létezik olyan) nem, vagy csak elégtelenül képes kiszolgálni. Tovább mindezekhez hozzáadódik még egy tényező, amelyet minden ember kisebb-nagyobb mennyiségben termel élete során: a hulladék [2].

A különböző típusú rosszul kezelt hulladékok eredményeként évente körülbelül egymillió ember hal meg, közvetve vagy közvetlenül. A viszonylag újnak számító műanyag hulladékok pedig még több problémát jelentenek, hiszen többségük lassan bomlik le, akár több száz évig is tarthat ez a folyamat.

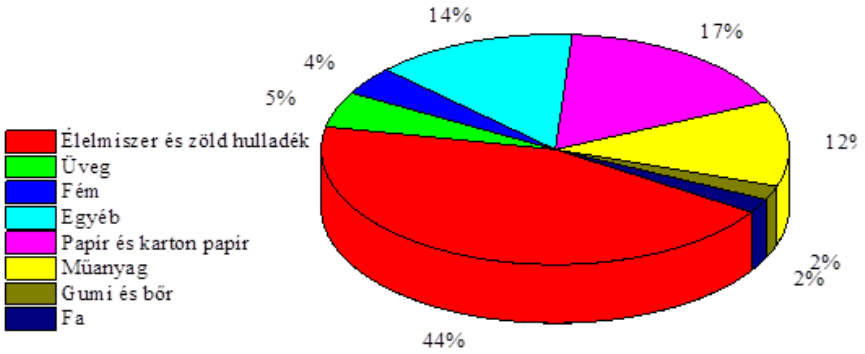
Sajnos hazánkban is problémát jelent a nem megfelelő hulladékgazdálkodás, ebből adódik a földek, vizeink és a levegő időszakos, vagy állandóvá váló szennyezettsége [3]. Ez utóbbit tekintve a legsúlyosabb gondokat az őszi, illetve téli hideg idő hozza el, a fűtési időszak beköszöntével. Ekkor a lakosság egy része nem csak a hagyományosnak mondható szén, fa, vagy gázalapú fűtést használja, hanem sajnálatos módon sokszor rosszabb minőségű fűtőanyagokat, hulladékokat is eltüzel. Az egyik legrosszabb opció azonban ezek közül a műanyag. Igaz, hogy nagy mennyiségben áll rendelkezésre, azonban nagy mennyiségű egészségre és környezetre káros anyagot bocsát ki a levegőbe is. Ezenfelül a műanyagot is tüzelő háztartásokban található tüzelőberendezések jelentős része igen rossz hatásfokon üzemel, így a benne lévő anyagok még lehetőségeikhez mérten sem égnek el tökéletesen. Ezzel saját és környezete egészségét is súlyosan károsítja az ilyen anyagokat tüzelőanyagként hasznosító személy [4].

Célunk, hogy a TDK dolgozatunkban a rendelkezésre álló hazai és nemzetközi irodalmat felhasználva bemutassuk, milyen típusú problémákat jelenthet a műanyag hulladékok elégetése. Célunk rávilágítani, hogy milyen egészségügyi és egyéb kockázatokkal járhat az elmúlt pár

évtizedben sajnos egyre nagyobb népszerűségnek örvendő, a háztartásokban leginkább különböző csomagolóanyagok formájában jelenlévő műanyagfajták házi tüzelőberendezésekben történő szakszerűtlen elégetése. Ehhez különböző tüzeléstechnikai vizsgálatokat végzünk három műanyag típuson, megvizsgáljuk az elégetésük során keletkező füstgázösszetételüket különböző tűztérhőmérsékletek és levegőáramlási beállítások mellett, hogy bebizonyítsuk, az eltüzelésük sokkal több kárt okoz az adott magánszemélynek, mint amennyi hasznot hoz.

2 A hulladékok keletkezése, fajtái, kezelésük, égetésük

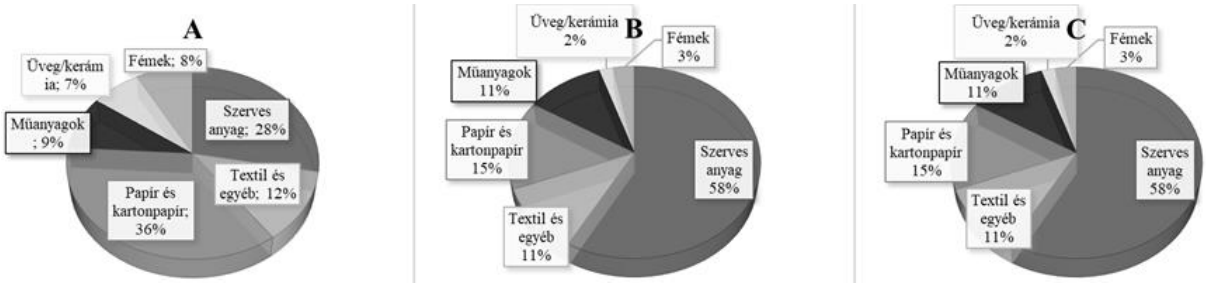
Napjainkban évente 1,6-2 milliárd tonna hulladék keletkezik a világon [5]. A világon keletkezett hulladék jelentős részét az élelmiszer- és a zöldhulladék teszi ki, melyet a papír és kartonhulladékok, valamint a műanyag hulladékok (12%) követnek (***1. ábra***).



1. ábra: Hulladék globális megoszlása [6]

A hulladék mennyiségét és összetételét számottevően befolyásolhatja az ország jövedelmi helyzete. A hulladék mennyisége és a gazdasági fejlettség között szoros kapcsolat áll fent. Minél fejlettebb az ország, annál több hulladékot termel. Ezt a jelenséget elsősorban az urbanizációval, valaint a gazdasági jóléttel lehet magyarázni [6].

Tanmoy Karak és társai által végzett kutatásból kiderül, hogy a magas jövedelemmel rendelkező országokban a keletkezett hulladék fő összetevője a papír, amelyet a szerves anyagok és a műanyagok követnek; a közepes és alacsonyabb jövedelmű országokban a szerves hulladék a meghatározó komponens, amelyet a papír és a műanyag követ (***2. ábra***) [7].



2. ábra: Hulladék-összetételének változása a jövedelem függvényében [7]

A ***2. ábrán*** az A-val jelölt diagram az alacsony életszínvonalú, a B-vel jelölt a közepes, míg a C-vel jelölt diagram a magas átlagjövedelmű és életszínvonalú országokat (pl. Japán, Dél-Koreai Köztársaság) jelöli [7].

A Világbank 2018 szeptemberében azt jósolta, hogy 2050-re 70%-kal fog növekedni az emberiség hulladék-termelése, amennyiben nem teszünk gyorsan megelőző lépéseket. A 7,6 milliárd ember nagyjából 2 milliárd tonna hulladékot termel évente. A népesség növekedése egyértelműen tovább súlyosbítja ezt a problémát, azonban a tényleges környezeti katasztrófát az okozza, hogy nagyon sok fejlődő társadalom van, amely a hulladékát nem kezeli [8].

Az OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) 36 országot rangsorol aszerint, hogy egy főre számítva mennyire hatékonyan kezelik hulladékukat. Eszerint első helyen Törökország, második helyen Lettország, harmadik helyen pedig Új-Zéland áll [8].

A hulladékkezelés legjobb módja az újrahasznosítás, de még az energetikai módon történő felhasználása (égetés) is sokkal kedvezőbbnek számít a hulladéklerakókban történő elhelyezésnél, az illegális hulladéklerakókat pedig már nem is említve. Az országok aszerint lettek pontozva, hogy évente hány kilogramm (az egy főre eső termelt, nem pedig el nem számolt) hulladékot hasznosítottak a felsorolt módszerekkel [8].

Magyarországon a hivatalos adatok szerint a valamilyen módszerrel kezelt (lerakással ártalmatlanított, energetikailag hasznosított, stb.) hulladékok mennyisége jellemzően csökkent a vizsgált 2012-2018 közötti időtartamon belül (***1. táblázat***), kivételt egyedül az építési-bontási hulladék kezelése képez ez alól [9].

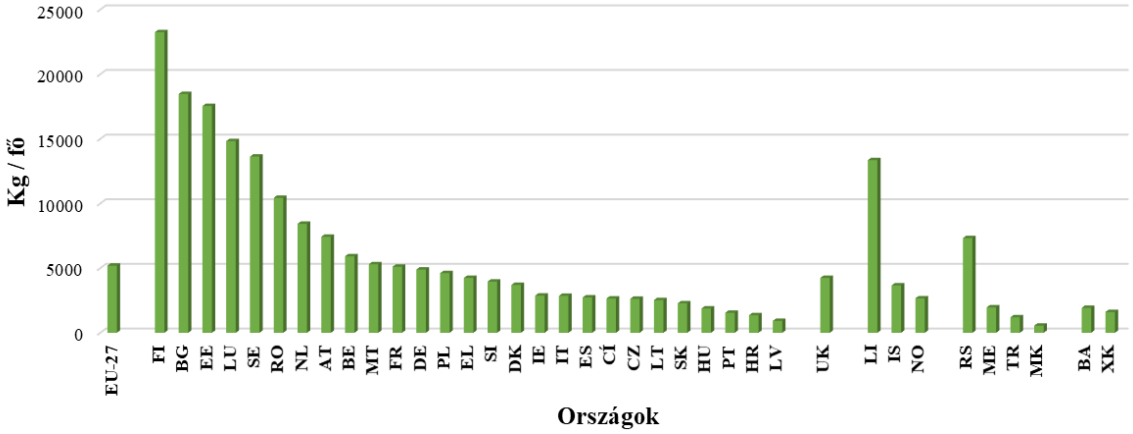
1. táblázat: A közszolgáltatás keretében elszállított települési hulladék összetétele Magyarországon (2006-2015) [10]

(%)

Hulladék	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Papír	12,7	18,9	18,4	18,8	14,8	14,7	13,3	14,0	12,9	13,4
Textil	3,4	3,9	3,9	3,7	3,5	3,5	3,6	3,4	3,2	3,5
Műanyag	11,8	18,3	18,3	19,1	15,6	15,5	16,3	16,5	14,5	13,0
Üveg	3,7	4,0	4,1	4,0	4,4	4,1	4,4	4,1	3,5	3,5
Fém	2,8	2,6	2,9	2,9	3,1	3,3	3,2	3,0	2,2	1,8
Bio	22,0	20,2	21,3	20,7	19,2	19,0	20,3	21,0	22,6	22,5
Lomtalanítás	3,1	3,6	3,6	3,5	3,1	2,9	2,7	2,4	2,4	3,1
Egyéb	40,6	28,6	27,5	27,1	35,8	36,5	35,8	35,0	37,9	38,6
Veszélyes hulladék	..	..	..	0,2	0,4	0,6	0,4	0,6	0,5	0,7

Az EU-27 országai különböző gazdasági irányzatai és a háztartások által termelt hulladék 2018-ban összesen 2317 millió tonna volt. Ebből az építőipar által termelt hulladék 36%-át tette ki a teljes mennyiségnek, míg a bányászat 26,2%-ot, a gyártás 10,6%-ot, végül a hulladék- és vízgazdálkodás és a háztartások összességében 8,2%-ot. A fennmaradó 9,1% eloszlott az egyéb

gazdasági ágazatok között, úgy mint a szolgáltatások (4,2%) és az energiaszektor (3,5%) között [11].



3. ábra: Európa országaiban az egy főre eső hulladék tömege, 2018-as adatok szerint [12]

Az ***3. ábra*** jól szemlélteti, hogy az egyes európai országokban 2018-ban mennyi hulladék jutott volna egy főre, ezen felül azt is, hogy egymáshoz képest ezek a számok hogyan viszonyulnak. Balról az első érték az EU 27 tagállamára vonatkozó átlagértékét mutatja (az Egyesült Királyságot kivették az EU országai közül, a statisztikában külön helyezkedik el), ami egy főre számítva 5,2 tonna volt. A diagram szerint a kisebb lélekszámú és jobb életszínvonalú országra esett a legnagyobb arányú hulladékmennyiség, így Finnország került az első helyre (23,25 tonna), Bulgária a második helyre (18,47 tonna) és a harmadik helyre Észtország került 17,539 tonnával. Magyarország a 24. helyen állt, 1,879 tonna/fővel, előtte Szlovákia, utána Portugália helyezkedett el [12].

Rátérve a dolgozatunk szorosabban vett témájára, műanyagot tartalmaznak sok esetben a különféle csomagolóanyagok, különféle használati tárgyak teljesen vagy részben. Felsorolhatnánk számtalan dolgot, így például a közlekedési eszközöket, elektronikai termékeket, orvosi eszközöket és hétköznapi tárgyainkat a konyhai eszközökön a szépészeti termékeken át az egészségügyi termékekig. Ez azt eredményezi, hogy egy egyszerű háztartásban is rengeteg ilyen típusú hulladék halmozódik fel egészen rövid időn belül. Még akik igyekeznek környezettudatosan élni és kerülni a számukra fölösleges termékek megvételét, azok sem tudják teljesen kiküszöbölni a műanyagok használatát, hiszen a műanyagok egyes típusait nagyon olcsó előállítani és rendkívül széles körben felhasználhatóak, mivel technikai értelemben rengeteg hasznos tulajdonságuk van. Ugyanakkor különválogatásuk meglehetősen körülményes, köszönhetően mennyiségüknek, összetételüknek és kialakításuknak is [12].

Az emberek sajnos gyakran pont amiatt kezdik el felhasználni fűtési célokra, mivel nagy mennyiségben rendelkezésükre áll. Egyesek azért, mert nem áll módjukban megvenni a jobb minőségű tüzelőanyagokat (szén, száraz fa), a földgáz pedig sokszor még csak be sincs kötve a házukba, az anyagi és társadalmi helyzetük miatt. Azonban sok olyan jómódú ember is él, akik szintén elégetik a műanyagokat, noha ők abszolút nincsenek erre rászorulva. Ennek néhány esetben a tájékozatlanság, vagy egyszerűen csak a nemtörődömség az oka. Mindezek mellett pedig egészen biztosan egy egyszerű, ám annál pusztítóbb jelenség is óriási szerepet játszik: a lustaság, ami „meggátolja" hogy keletkezett hulladékaikat az arra kijelölt helyre, nevezetesen a szemetesbe ürítsék, ne pedig a kazánba vagy a kályhába.

A kisméretű tüzelőberendezések egyik hátránya, hogy potenciálisan a hulladékok elégetésére is felhasználják. Az ilyen jellegű, háztartásokban alkalmazott berendezések olyan légnemű szennyezőanyagokat produkálnak, amelyek az égéstér közelében kellemetlen szagokkal és mérgező anyagokkal terítik be a lakóközösségeket. Ez egészségkárosító hatású és a vagyontárgyakat is rongálhatja. Azt azonban a szennyezést elszenvedők és az üzemeltetők számára nehéz bizonyítani, hogy a hulladékot egy háztartási égető berendezésben égették el. Ennek megállapításához nyújthat segítséget a hulladékok égetése után visszamaradt hamu és a keletkező füstgázok analízise [13].

A változó összetételű- és fűtőértékű hulladék vegyes égetése tüzelőanyagokkal a Cseh Köztársaságban, Lengyelországban, Litvániában és Magyarországon is problémát jelent [13].

Új jogszabályok kerültek bevezetésre Lengyelországban és a Cseh Köztársaságban, hogy engedélyezze a környezetvédelmi ellenőrök, valamint a helyi önkormányzatok képviselői számára, hogy a kisméretű tüzelőberendezések tüzelőanyagának ellenőrzése céljából beléphessenek az állampolgárok otthonába. Kötelezik a lakosságot arra, hogy csak az előírásoknak megfelelő szerkezetű és műszaki állapotban lévő tüzelőberendezésben égethetnek el olyan tüzelőanyagokat, amiket lefednek a meghatározott specifikumok [13].

Az üveg átlagosan 3-4%-át teszi ki a hulladéknak, bár ez az arány egyre inkább növekszik, ami betudható annak, hogy mind ritkábbak a visszaváltható csomagolású termékek. Helyettük az eldobható műanyag- és üveg csomagolások váltak elterjedtté. Ezzel azonban egyrészt értékes alapanyagok vesznek oda, mivel ha nincs különválogatva a hulladék, akkor az újrahasznosítása is minimális lesz az üvegnek, másrészt a legyártásába adott rengeteg energia is kárbavész [14].

A kombinált összetételű hulladékra remek példák a gyümölcslevet, vagy tejet tartalmazó dobozok. Ezek jellemzően fémet, papírt és műanyagot egyaránt tartalmaznak, bár köszönhetően

a csomagolóanyag-ipar tevékenységének, rengeteg más változatuk is elterjedt. Ennek a hulladéktípusnak igen nehézkes a szétválasztása és feldolgozása, ezenfelül rendkívül gazdaságtalan is, így célszerű elkerülni az ilyen csomagolású termékeket [14].

A veszélyes hulladék csupán 1% körüli, de az ebbe a kategóriába sorolható hulladékok által okozott környezeti kár igen jelentős [14].

Az az öt polimer, amit talán a leggyakrabban használnak, az iparban és a háztartásokban egyaránt, a következőek: polietilén tereftalát (PETE vagy PET), polietilén (PE), polivinil klorid (PVC), polipropilén (PP) és a polisztirén (PS). Az általunk a kísérlethez felhasznált 3 műanyag (PET, PP, HDPE) a továbbiakban lesznek részletesebben jellemezve [15] [16].

2.1 Műanyagok károsanyag-kibocsátása égetés során

A környezeti légszennyezés a világ jelenleg egyik legnagyobb környezeti- és egyészségügyi problémáinak okozója. A helyzet súlyosbodni látszik azon országoknál, amelyeknél napjainkban indult be jobban az iparosodás [17].

Egyre több bizonyíték van arra nézve is, hogy a légszennyezés hosszú távú hatással van egészségünk és jólétünk egyéb aspektusaira is, amilyenek például a kognitív funkcióink. Ezen kívül megnöveli a korai elhalálozás kockázatát is: nagyjából 3,4 millió halálért felelős évente az utóbbi évtizedekben. Egyes országokban a statisztikai adatok szerint 10 halálesetből 1-ért ez tehető felelőssé [17].

Az égés során számtalan káros anyag szabadul fel, mivel a műanyagok és különböző gumitípusok nem csak az alapjukat képező szénlánc alapú molekulával rendelkező polimereket tartalmazzák, hanem különféle adalékanyagokat is, amelyek különféle aromás és kénvegyületek is lehetnek. Az egyik oka, hogy nehéz a műanyagokat tökéletesen elégetni, mivel egyes típusaik inkább megolvadnak és összezsugorodnak, de nem, vagy csak nagyon nehezen gyulladnak meg. Amennyiben mégis sikerül elégetni, nagy rá az esély, hogy nem lesz tökéletes az égés. Ebből következik, hogy nem csak CO_2, hanem CO is termelődik, ezenfelül ha kéntartalma is volt az anyagnak akkor kén-dioxid, esetleg kén-trioxid, amelyek vízzel keveredve kénes savat, vagy kénsavat képezhetnek [3] [18].

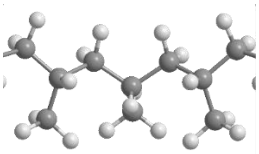
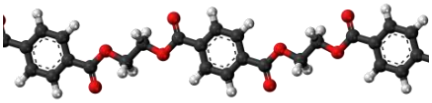
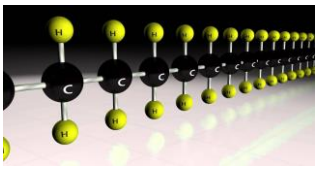
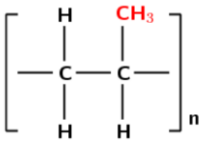
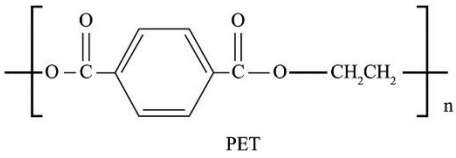
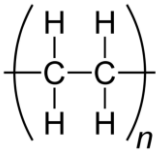
3 Anyagok és módszerek

A vizsgálatainkat polipropilénen, polietilénen és polietilén-tereftaláton végeztük el. Az alábbiakban ezeket az anyagokat, valamint a vizsgálataikhoz felhasznált módszereket mutatjuk be.

3.1 Vizsgálati anyagok

A kísérletekhez felhasznált három különböző műanyag fajta fontosabb tulajdonságait a ***2. táblázat*** segítségével vetjük össze.

2. táblázat: A vizsgált műanyag típusok szerkezete és mintaként szolgáló „termék”

PP	**PET**	**HDPE**
 [19]	 [20]	 [21]
 [22]	 [23]	 [24]
[25]	[25]	[25]

A vizsgált műanyagok tulajdonságait bővebben a következő alfejezetben részletezzük.

3.1.1 Polipropilén

A polipropilén egyfajta termoplasztikus polimer gyanta, amelyet egyaránt előszeretettel használnak a háztartásokban és az iparban. Képlete: C_3H_6 [26].

Felhasználásának rengeteg módja van, elsősorban szerkezeti, vagy szálas műanyag formájában. 1954-ben Karl Rehn német származású, valamint Giulio Natta olasz származású vegyészek polimerizálták először. Játékokat, szöveteket, laboreszközöket állíthatnak elő, illetve elektromos eszközökhöz és autókhoz gyárthatnak alkatrészeket belőle [26].

Előnyei közé tartozik, hogy hasonló tömegű polimerekhez képest magasabb olvadásponttal (160 ^{o}C) rendelkezik. Ez lehetővé teszi, hogy pl. mikrohullámú sütőkben is alkalmazhatóak a belőlük készült tárolóedények, ezenfelül könnyűek és rugalmasak [26].

3.1.2 Polietilén

A polietilén az egyik legelterjedtebb polimerizációs műanyag. Képlete: $(C_2H_4)n$
Három típusa van: az LDPE (low density=alacsony sűrűségű), az MDPE (middle density= közepes sűrűségű) valamint a HDPE (high density=nagy sűrűségű) polietilén [27].

Karl Ziegler fejlesztette ki azt a később róla elnevezett eljárást 1953-ban, ami a nagysűrűségű polietilén előállítását lehetővé tette az alacsonyabb, 60 °C-os hőmérsékleten, illetve nyomáson (kb. 1 atmoszféra). A molekula lánca nagyjából 100-10000 etilén molekulából áll, előállítása megfelelő katalizátor jelenlétében történik etilénből, magas nyomáson. A folyamathoz használt katalizátor lehet pl.: titán(IV)-klorid ($TiCl_4$); alumínium-alkil (pl. trietil-aluminium / $Al(C_2H_5)_3$; trimetil-aluminium / $C_6H_{18}Al_2$) [27].

A Ziegler-eljárással előállított polietilén több egyenes láncú molekulát tartalmaz, mint a korábbi, alacsony sűrűségű polietilén. Ennek köszönhetően az olvadáspontja magasabb lett, továbbá merevebbé is vált. 1954-ben a módszert Giulio Natta fejlesztette tovább [27].

Fizikai és kémia tulajdonságait tekintve fehér színű, szilárd anyag, olvadáspontja 85-140 °C között van. Hőre lágyuló, éghető, mesterségesen előállított polimerizációs és fonalas szerkezetű műanyag, sűrűsége 0.91-0.96 g/cm^3 közé tehető. Jó szigetelő és fagyálló (mivel az amorf részeinek üvegesedési hőmérséklete alacsony, kb. -80°C) tulajdonságokkal bír [27].

Jó a vegyszerállósága, nincs oldószere szobahőmérsékleten. Aromás és alifás szénhidrogénekben viszonylag magas, 60 °C feletti hőmérsékleten oldódik. A híg lúgok és savak oldatainak ellenáll, de magasabb hőmérsékleten a tömény savak roncsolják, fluorral hevesen reagál. Jók a dielektromos tulajdonságai (nagyfrekvenciás szigetelő), köszönhetően kis

vízfelvételének és apoláros szerkezetének. Gáz- és gőz áteresztése alacsony, hő hatására bekövetkező bomlása 290 °C-nál kezdődik. Fizikai és kémiai tulajdonságai a sűrűségétől és a benne lévő molekulák tömegétől függően is változik [27].

Hátránya, hogy viszonylag gyengék a szilárdsági és a termikus tulajdonságai. Feszültségkorróziós hajlama nagy, ami azt jelenti, hogy mechanikai feszültség és vegyszerek (felületaktív anyagok, pl. szappanok) együttes hatására megrepedhet. Feszültségmentes állapotban a vegyszerekkel szemben ellenálló [27].

Világszerte nagyon nagy mennyiséget állítanak elő belőle, fröccsöntéssel, extrudálással, vagy fúvással. Nagyon gyakran találkozhatunk vele tasakok, szemeteszsákok stb. formájában. A belőle gyártott szálakat szúnyoghálókhoz, zsákokhoz műszaki textíliák gyártásához is felhasználják. Fröccsöntéssel egyebek mellett flakonok, tálcák, kannák előállításánál, cső- és profilextrúziós termékek (olaj- és gázvezetékek, ivóvíz-vezetékek, ipari csővezetékek) gyártásánál használjak fel. (A gázvezetékek csöveit szinte kizárólag polietilénből készítik mostanában.) Egyéb felhasználási területek: kábelszigetelések 45-55% habosítási fokkal telefonkábelek érszigeteléséhez alkalmazva, valamint hőszigetelések esetében polifoam hab termékek (pl. matracok, csőhéjak, stb.) alapanyagául szolgál [27].

3.1.3 Polietilén-tereftalát

A polietilén tereftalát, röviden PET vagy PETE egy széleskörben alkalmazott alifás, termoplasztikus polimer, ami a poliészterek családjába tartozik. A poliészter gyanták jó mechanikai, termikus tulajdonságokkal bírnak, ezenfelül kémiailag ellenállóak alkoholokkal, alifás szénhidrogénekkel, olajokkal szemben, viszont csak mérsékelten rezisztens pl. hígított lúgokkal, aromás és halogénezett szénhidrogénekkel szemben. Az egyik legnagyobb mértékben reciklált termoplasztik, újrahasznosítási megjelölése az 1-es. Képlete: $(C_{10}H_8O_4)n$ [28].

Újrahasznosítását követően különböző szálakká, szövetekké, lepedőkké alakítható, az autóipari alkatrészek csomagolásához és gyártásához is alkalmazhatják. Kémiailag a polietilén-tereftalát nagyon hasonlít a polibutilén-tereftalátra [28].

A PET természetes állapotában rendkívül rugalmas, színtelen, félkristályos gyanta. Feldolgozásának módjától függően lehet félmerev vagy merev. Jó a méretstabilitása, valamint nagymértékű ellenállóságot mutat az ütődésekkel, a nedvességgel, az alkoholokkal és egyéb oldószerekkel szemben [28].

Előnyei közé sorolható, hogy könnyű és erős, emiatt hatékonyan és könnyen szállítható. A nedvesség- és gázzáró tulajdonságai jók, (különösen CO_2-vel szemben alacsony az áteresztő

képessége), ezenfelül elektromos szigetelőként is remekül alkalmazható. Széles hőmérsékleti tartományban (-60 és +130 °C között) felhasználható. Az üveg helyettesítésére alkalmas lehet átlátszósága miatt, a mikrohullámú sugárzást is átengedi. Több minőségügyi ügynökség (pl. FDA, EFSA, stb.) is engedélyezi a PET-et élelmiszerek és italok tárolására [28].

A forrásban lévő víz negatív hatással van rá, ezenfelül rossz égési tulajdonságokkal rendelkezik. A PET egy alifás poliészter. Lehetséges formázási módjai: fröccsöntés, extrudálás, fúvás, hőformázás, valamint újabban előszeretettel használják 3D nyomtatáshoz is [28].

3.2 Vizsgálati módszerek

A következő alfejezetekben bemutatjuk azokat a vizsgálati módszereket, és mérőműszereket, melyek segítségével a vizsgált anyagaink legfontosabb tulajdonságait meghatároztuk és az égetési kísérletek elvégeztük.

3.2.1 Az égéshő meghatározása

Az égéshő meghatározás során az „**MSZ 24000-5:1978** *Szenek laboratóriumi vizsgálata. Az égéshő meghatározása és a fűtőérték kiszámítása*” vizsgálati szabványt alkalmaztuk.

A vizsgálathoz Parr6200 izoberibolikus bombakalorimétert alkalmaztunk, melynek szerkezeti felépítését a ***4. ábra*** tartalmazza. A kalibrálóanyag és a minta bemérését OHAUS Pioneer PA214C típusú analitikai mérleggel végeztük el, melynek felbontása 0,1 mg. Az égéshő meghatározásához a mintát tiszta oxigénben égettük el a készülék bombájában, 3 MPa nyomás alatt. A fűtőérték meghatározása az égéshőből számítással történt [29].

A vizsgálat során a minta égető tégelybe töltése és mérlegelése után a bombát oxigénnel töltjük 30 bar nyomásig. Az így előkészített bomba a kaloriméter vízzel töltött edényébe kerül, majd a fürdőhőmérséklet stabilizálódása után a bomba elektródáihoz kötött gyújtózsinór segítségével a mintát elégetjük. Az égéskor felszabaduló hő elnyelődik az edény vizében, így a hőmérséklet emelkedése, a kaloriméter hőkapacitása és a minta tömege alapján az égéshő meghatározható a bombában lejátszódó egyéb hőtermelő folyamatok figyelembevételével (pl. gyújtózsinór égése). A kis fűtőrétékű mintákhoz benzoesav pasztillát kell adni, melyből felszabaduló hővel szintén korrigáltunk. A berendezés hőkapacitását ismert szintén benzoesav elégetésével határozzuk meg. A bomba belsejében a keletkezett vízgőz lecsapódik, a fűtőérték meghatározása így külön számítással történik a minta nedvességtartalma és/vagy hidrogéntartalma ismeretében. A számítás során az elemanalízis során kapott összes hidrogéntartalmat (tartalmazza a víz formában lévő hidrogént is), vagy a termogravimetriás

vizsgálattal meghatározott víztartalmat használhatjuk fel a kalkulációkhoz az alábbi képletek valamelyike szerint [29]:

$$Q_i = Q_s - \gamma \cdot 8{,}94 \cdot H_t \tag{1}$$

vagy

$$Q_i = Q_s - \gamma \cdot W_t \tag{2}$$

ahol:

Q_s - mért égéshő, kJ/kg

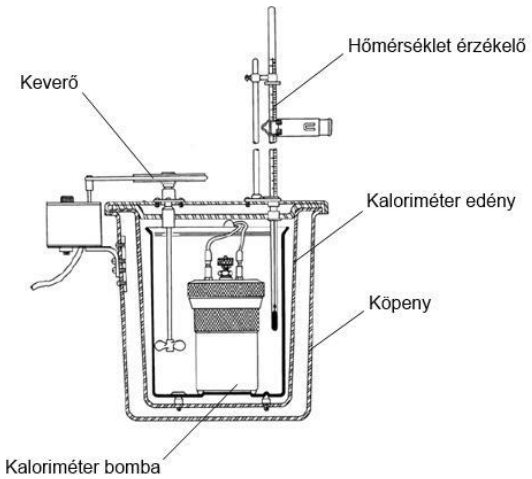
Q_i - számított fűtőérték, kJ/kg

γ - a víz párolgáshőjéből adódó együttható, értéke 24,42

8,94 - együttható a hidrogén tömegének vízre való átszámítására

H_t - az összes hidrogéntartalom, % (m/m)

W_t - a termogravimetriával meghatározott víztartalom

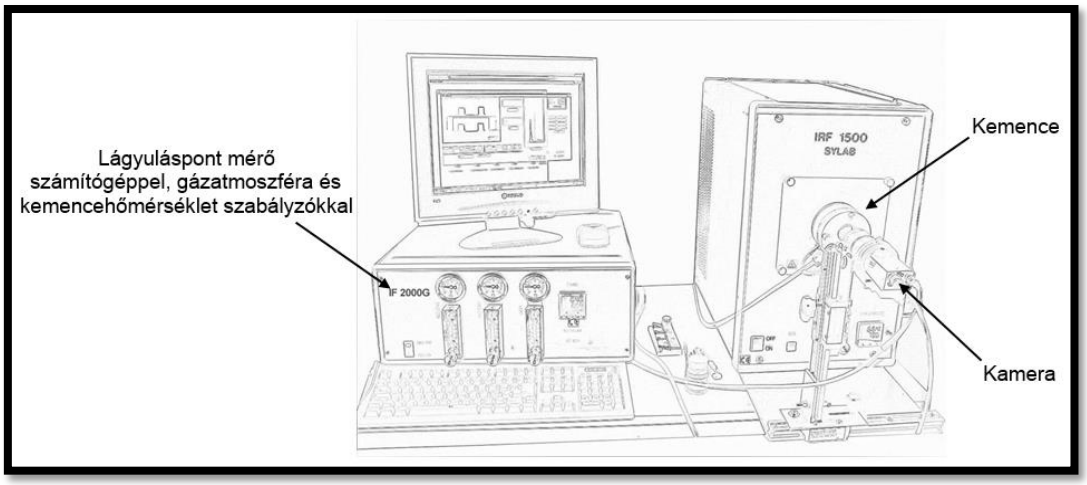


4. ábra: Bombakaloriméter elvi felépítése [29]

3.2.2 Lágyulási és olvadási paraméterek meghatározása hevítőmikroszkóppal

A műanyag hulladékokból készült minták lágyulási és olvadási tulajdonságait SYLAB IF2000G típusú hevítőmikroszkóp segítségével vizsgáltuk. A minták lágyulási paramétereinek kísérleti úton való meghatározására többféle eljárás ismeretes, amelyeket a következő csoportokra lehet osztani [31]:

- A mintákból készült próbatest kemencében történő hevítésekor nyomon követjük a minta méreteinek, alakjának a változását.
- A próbatesteket izzítás közben összenyomjuk és a magasság csökkenését regisztráljuk.
- A minta elektromos ellenállását mérjük.



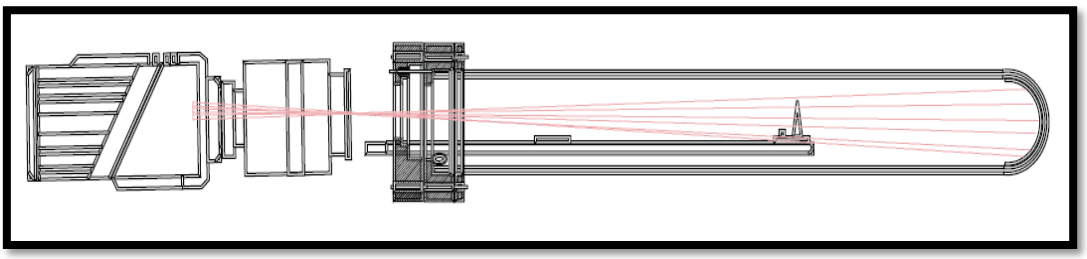
5. ábra: A SYLAB IF2000G lágyulásmérő berendezés részegységei [31]

A SYLAB IF2000G az első módszert alkalmazza. A lágyuláspont mérő (***5. ábra***) a következő részekből tevődik össze [31]:

- 1600 °C-ig fűthető kemence, melynek cső alakú munkatere a mérés ideje alatt tartalmazza a mintát és a kemenceatmoszférát.
- A kemenceatmoszféra és a kemencehőmérséklet külső szabályozó berendezéseit is magában foglaló lágyuláspont mérő, amely számítógéppel van összeépítve. Az adatgyűjtő szoftver a számítógépre telepített.
- Digitális kamera a minta próbatestének fényképezésére.

A vizsgálat előtt a műanyag hulladékokból néhány mm-es próbatesteket metszettünk ki, melyeket a mintatartóra helyezve a kemencébe csúsztattuk, mely egybe van építve a kemence nyílását lezáró, kémlelő üveggel ellátott fedéllel. Ezek utána a kamerát a minta nézeti képének irányába fordítottuk. A készülék a hozzá tartozó IRF 1500 típusú kemencébe helyezett próbatestek képét regisztrálja egy digitális kamera segítségével a minták hőmérsékletének függvényében. A felfűtés programozott. A képsorozatból a lágyulási paraméterek értékelhetők [31].

A ***6. ábra*** a kemencébe tolt próbatestet szemlélteti a digitális kamerával.



6. ábra: A kemence munkaterében elhelyezett próbatest képe a kamerával [31]

A vizsgálat anyag lágyulási és olvadási tulajdonságait az alábbi hőmérsékleti pontokkal jellemezhetjük [31]:

- Szintereződési hőmérséklet (IT): Az a hőmérséklet ahol a minta magassága a kiinduláshoz képest 5%-ot csökkent.
- Deformációs pont (DT): Az a hőmérséklet ahol a próbatest kezd gömbszerűvé válni, a sarkok, élek elkezdenek lekerekedni.
- Gömb hőmérséklet (ST): Az a hőmérséklet ahol a lágyulás jelei megjelennek pl.: a felület megváltozása, élek lekerekedése, a próbatest felfúvósodásának kezdete, a minta a felületi feszültség miatt gömbszerűvé válik.
- Félgömb hőmérséklet (HT): Az a hőmérséklet ahol a próbatest alakja hasonlít egy félgömbre, a megolvadt próbatest fele olyan magas, mint az alapvonala.
- Folyási (megolvadási) hőmérséklet (FT): Az a hőmérséklet ahol a próbatest a kiinduló magasság harmadára olvad meg.

A vizsgálat során a mintákat szabályozott körülmények között hevítjük. A műszer kamerája az alakváltozást folyamatosan rögzíti és a különböző szabványok szerinti karakterisztikus hőmérsékleteket (DT, ST, HT, és FT) automatikusan meghatározza[32].

3.2.3 Termoanalitikai vizsgálatok

A termoanalitikai módszerek csoportjába azok az eljárások tartoznak, amelyek a minta valamely jellemzőjének megváltozását követik a hőmérséklet növelése és az idő függvényében. A termoanalitikai módszerek alapvetően tehát mindazoknak a kémiai folyamatoknak/változásoknak a tanulmányozását lehetővé teszi, amelyek melegítéssel vagy hűtéssel függnek össze (például hőbomlás, pirolízis, égés, fázisváltozások, kalorimetria). A termoanalitikai módszereket a ***3. táblázatban*** tüntetjük fel. Ezek közül a termogravimetria a legegyszerűbb és legalapvetőbb termoanalitikai módszer [33].

3. táblázat: Jelentősebb termoanalitikai módszerek [34]

A módszer elnevezése	A hőmérséklet függvényében mért tulajdonság	Alkalmazott készülék
Termogravimetria (TG)	tömeg	Termomérleg
Derivatív Termogravimetria (DTG)	tömegváltozás sebessége	Számítógéppel állítják elő
Differenciál Termoanalízis (DTA)	hőmérsékletkülönbség a minta és a referencia anyag között	DTA berendezés

A derivatográfia olyan összetett termoanalitikai módszer, amellyel a vizsgált minta hevítése során bekövetkező átalakulásokat kísérő hőenergia- és tömegváltozások egyidejűleg meghatározhatók. Az erre alkalmas készülék a derivatográf, amely a hőmérséklet- (T-), termogravimetria- (TG-), differenciál termogravimetria- (DTG-), differenciál termoanalízis- (DTA-) görbéket egy időben automatikusan veszi fel. Ezzel a módszerrel a legkisebb tömegváltozást, vagy hőmérsékletváltozást is a legnagyobb érzékenységgel és pontossággal lehet kimutatni [31][35].

A derivatogramon négy görbe látható, melyek a következők [31]:

- Termogravimetria (TG): ez a görbe a hőmérséklet emelkedésének hatására a mintában bekövetkező tömegváltozást mutatja.
- Differenciál termogravimetria (DTG): ahol a TG-görbének inflexiós pontja van, ott a DTG-görbén csúcs jelentkezik, ez által pontos képet alkothatunk a mintában lezajló tömegváltozási folyamatokról.
- Differenciál-termikus analízis (DTA): a kapott görbe a minimuma felé endoterm, míg a maximuma felé haladva exoterm folyamatokra utal.
- Kétszeresen differenciál-termikus analízis (DDTA): ahol a DTA-görbének inflexiós pontja van, ott a DDTA-görbén csúcs jelentkezik, ez által pontos képet alkothatunk a mintában lezajló termikus folyamatokról.

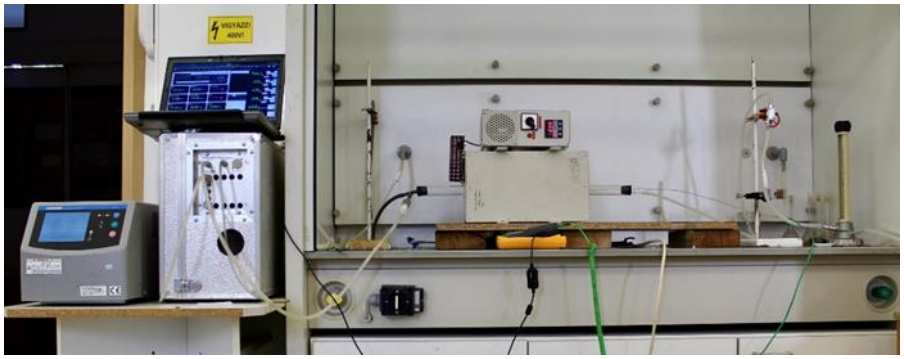
A termoanalitikai vizsgálatokat MOM Q1500D típusú derivatográffal végeztük el, melyről a ***7. ábrán*** látható fényképfelvétel. A vizsgálatok során 9 °C/min felfűtési sebességet alkalmaztunk.

7. ábra: MOM Q1500D típusú derivatográffal [36]

A mérés során a vizsgálati mintát egy porcelán tégelybe helyezzük, a berendezés másik „kara” az etalon, így gyakorlatilag egy mérlegre helyezzük a mintákat. A berendezés a minta és az etalon hőmérsékletét méri differenciál termoelemmel. A mérleg segítségével a TG-görbét kapjuk meg. A mérleg második tényleges „karja” egy mágneses erőtérbe benyúló nagy menetszámú tekercs, mellyel a mérleg kitérésének sebessége, tehát a DTG-görbe határozható meg. A mért jelek detektálása elektronikus úton, a mérési adatok gyűjtése digitalizálva, az adatok tárolása és kiértékelése pedig számítógép segítségével történik [31].

3.2.4 Csőkemencében végzett égetési kísérletek

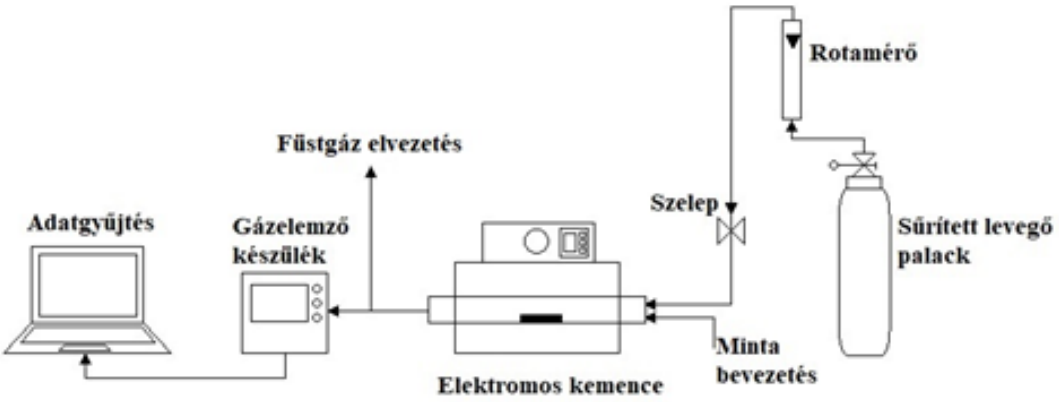
Az égési folyamat vizsgálatát egy Hőker Cső 350/900 típusú, elektromos ellenállásos csőkemencében végeztük el.



8. ábra: Mérőkör gázösszetevők megállapításához

Az eszköz vízszintesen elhelyezkedő munkakamrával, valamint programozható hőmérséklet-szabályozóval rendelkezik, ennek köszönhetően lehetővé válik az adott időben beállított

hőmérséklet fenntartása. Az égési folyamatból származó gázok (CO_2, O_2, CO, NOx) koncentrációjának elemzését jelen esetben egy Horiba PG 250 típusú gázelemző készülékkel kiviteleztük. A sűrített levegős palack, a rotamérő és a szelep a légáramlás sebességét hivatott szabályozni. A kísérleti beállítást vázlatosan a ***9. ábra*** szemlélteti.



9. ábra: Mérési kör elméleti ábrája az égetési kísérletekhez

A mérés során a kerámia csónakba helyezett kisméretű mintát betoltuk a vizsgálati hőmérsékletre hevített kemencébe (***9. ábra***: Minta bevezetés). A kiértékelendő mérési folyamat akkor kezdődött, amikor a füstgázelemző készülék adatai alapján az oxigén mennyisége csökkenni kezdett. Az egész égési folyamat percek alatt lejátszódott, és a rendszer tisztítása után következett az újabb mérés. A füstgáz a gázelemző készülékbe jutás előtt egy szűrőpapíron haladt át, mely megfogta a szilárd szennyezőket. Ez a szűrőpapír szolgáltatta a vizsgálati mintákat a pásztázó elektronmikroszkópos elemzésekhez.

3.2.5 Elektronmikroszkópos vizsgálat

Pásztázó elektronmikroszkóp segítségével megvizsgáltuk a füstgázzal távozó szilárd szennyezők morfológiáját és összetételét.

A pásztázó elektronmikroszkóp a pásztázás technika elvét alkalmazza, amely a soros, pontról-pontra létrehozott képképzést használja. A vizsgálandó minta TEM-mel ellentétben vékonyítást nem igényel, bár nemfémes anyagokat valamilyen fémmel be kell vonni (pl. arany, karbon) hogy ne töldődhessenek fel a rávitt elektronok hatására. A felhalmozódott töltés egyrészt a kép minőségét ronthatja, szélsőséges esetben pedig az eszköz meghibásodásához is vezethet [30]. A mintának ki kell bírnia a vákuumot, tehát víztartalmú mintát nem rakhatunk a mikroszkópba (kivéve a speciális, biológiai mintákhoz kifejlesztett változatot, az ESEM-et). Legjobb nagyítás az ún. szekunder elektronokkal érhető el.

A SEM mikroszkópokat röntgen detektorral is gyakran felszerelik, ami segítségével az elektronok gerjesztette atomok által kibocsátott röntgen fotonokat lehet detektálni. Ezek energiája azon atomokra jellemző, amelyek kibocsátották őket, így az atomi minta összetételéről nyerhetünk információkat. Ez az EDX (energiadiszperzív röntgen mikroanalízis), ami nem csak kvalitatív (minőségi), hanem kvantitatív (mennyiségi) analízist is lehetővé tesz számunkra [30].

Esetünkben a műanyagok égetése során keletkező füstgáz útjába helyezett szűrőpapírral felfogott szilárd szennyező anyagokat akartuk mennyiségi és minőségi szempontból is elemezni. Kezdetben az eredeti szűrőpapírt készítettük elő mintaként, azonban olyan „nagy” mennyiségben tartalmazta a „port”, hogy a készített felvételek értékelhetetlenek voltak. Ezért azt a módszert alkalmaztuk, hogy ragasztószalag segítségével vettünk le kisebb mennyiségű port a szűrőpapírról és így már értékelhető mintákat kaptunk.

4 Eredmények

4.1 Kísérleti anyagok fizikai és kémiai tulajdonságai

A következő alfejezetekben az égetési kísérletek során vizsgált műanyagok tüzeléstechnikai szempontból legfontosabb tulajdonságait fogjuk elemezni.

4.1.1 A vizsgált műanyagok tüzeléstechnikai paraméterei

A ***1. táblázat*ban** a műanyagok tüzeléstechnikai paramétereit láthatjuk, a felkövérrel szedettek a saját mérési eredményeket mutatják, illetve az alattuk lévő [37], [38] és [39] jelöléssel látható részek pedig a vonatkozó szakcikkekben található referencia értékeket jelölik.

4. táblázat: Műanyagok tüzeléstechnikai paraméterei

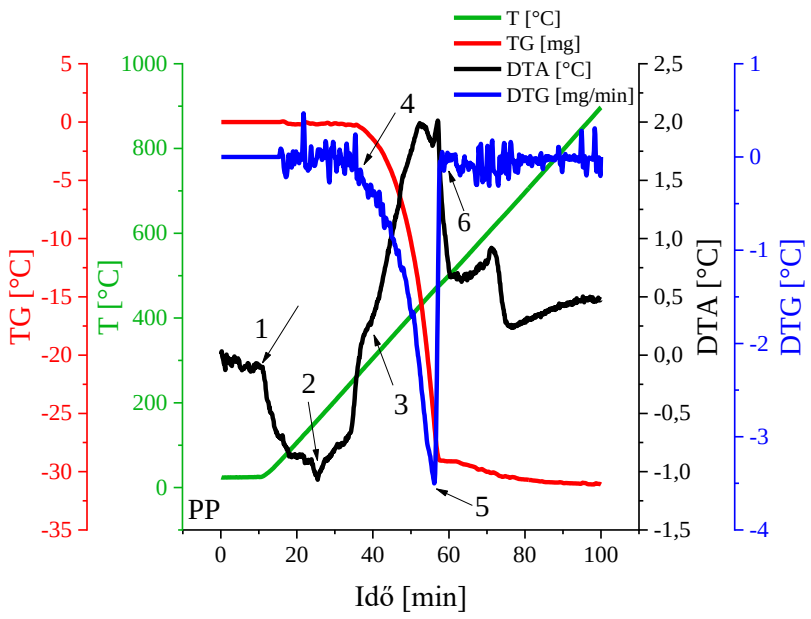
Anyag neve		Nedv.	Hamu^{sz}	C^{sz}	H^{sz}	N^{sz}	S^{sz}	HHV^{sz}
		m/m %						MJ/kg
PP	**mért**	**0,30**	**1,37**	**83,41**	**14,07**	**0,09**	**0,03**	**47,06**
	[37]	0	0,16	84,30	14,44	0,18	0,03	45,77
HDPE	**mért**	**0,13**	**0,47**	**77,96**	**15,70**	**0,08**	**0,01**	**46,04**
	[38]	n.a.	n.a.	86,1	13,00	n.a.	n.a.	46,40
PET	**mért**	**0,52**	**0,07**	**67,72**	**4,54**	**0,03**	**0,01**	**22,73**
	[39]	n.a.	n.a.	61,62	4,73	0,26	n.a.	21,64

A ***4. táblázat*** adatai alapján látható, hogy a műanyagok nagy C-tartalommal rendelkeznek, melyhez nagy égéshő párosul. A PP és a HDPE tüzeléstechnikai paraméterei hasonlóak, ugyanis molekula szerkezetük csak egy metil csoportban tér el (***2. táblázat***).

4.1.2 Alapanyagok termoanalitikai vizsgálata

A termoanalitikai vizsgálatokat derivatográf segítségével végeztük el, melyet hevítőmikroszkópos vizsgálatokkal egészítettünk ki. Ezzel a módszerrel megfigyelhettük, hogy a műanyagaink hogyan viselkednek a hőmérséklet növekedésével.

A ***10***., ***12***. és ***14. ábrán*** a vizsgált műanyagok derivatogramjait ábrázoltuk, melyeken nevezetes pontokat jelöltünk be. A DTA görbén látható 1. és 3. pontokon a műanyagok olvadási fázisa (endoterm folyamat), míg a DTG görbén látható 4. és 6. pontokon a műanyagok hőbomlásának fázisa, azaz égési fázis figyelhető meg. Az égési fázis a DTA görbén exoterm folyamatként jelenik meg. A DTA görbe 2. pontja az olvadás, míg a DTG görbe 5. pontja az égési fázis legintenzívebb szakaszát mutatja meg. A nevezetes pontok kiolvasható adatokat a **5.**, **8.**, és **9.** ***táblázat*ban** tüntettük fel.



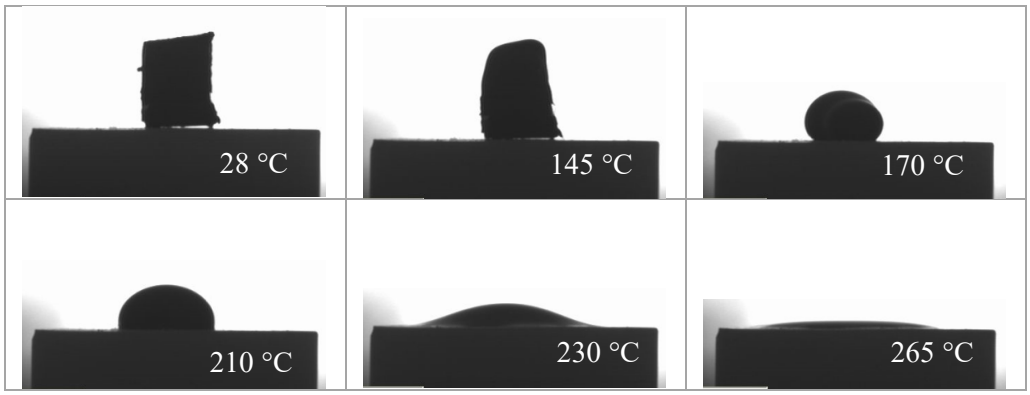
10. ábra: A PP minta derivatogramja, a minta tömegváltozásai és hő effektusai a hőmérséklet függvényében

A ***10. ábrán*** a PP minta derivatogramjai láthatók. A DTA és DTG görbén feltüntetett nevezetes pontokhoz tartozó adatokat a ***5. táblázat*** tartalmazza. Látható, hogy az olvadási szakasz (1.-3. pont) körülbelül 30 perc alatt ment végbe, míg a műanyag hőbomlási szakasza (4.-6- pont) 20 perc alatt zajlott le.

5. táblázat: A ***10. ábra*** derivatogramjaiból kiolvasható adatok

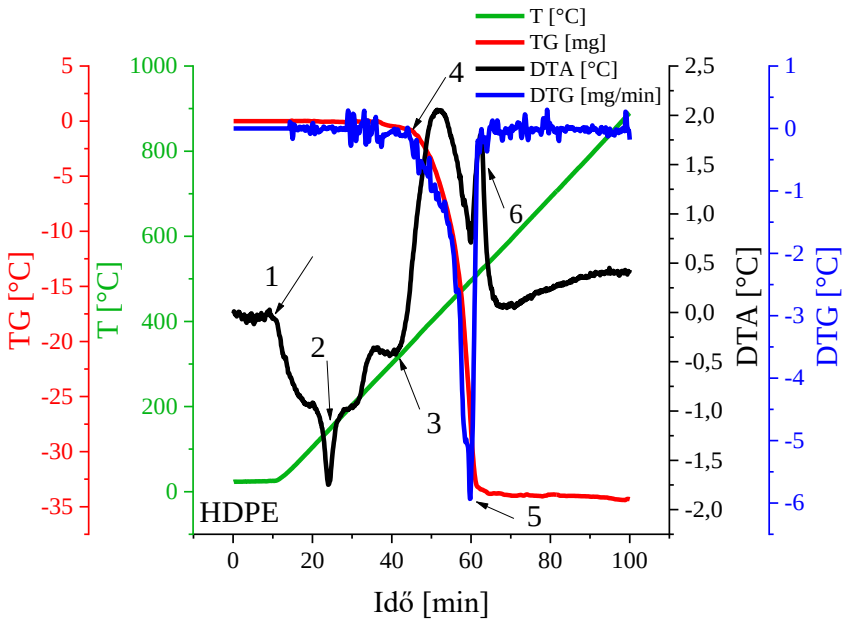
Visszamaradt anyag [% m/m]	Olvadási hőmérséklet tartománya [°C]	Legintenzívebb olvadási hőmérséklet [°C]	Hőbontás hőmérséklet tartománya [°C]	Legintenzívebb hőbontás hőmérséklet [°C]
69,90	27,27 – 271, 96	160,45	281,21 – 476,67	465,71

A derivatográf berendezésben lezajló folyamatok vizuális szemléltetésére hevítőmikroszkópos vizsgálatokat végeztünk. A PP olvadási fázisait a ***11. ábra*** szemlélteti. A DTA görbe szerint a legintenzívebb olvadási hőmérséklet 160 °C körül található, azonban a hevítőmikroszkópos vizsgálatok során ez a hőmérséklet körülbelül 170 °C-ra tehető. Ez az eltérés nem tekinthető számottevően, ugyanis a szakirodalomban található adatok is a 160-170 °C-os tartományba helyezik az olvadási pontot [40][41][42].



11. ábra: Polipropilén olvadási fázisai

Az ***5. táblázat*** és ***11. ábra*** adataiból is egyértelműen kijelenthető, hogy 270 °C-ig a PP elolvad. Az olvadást követően kezdődik meg az anyag hőbomlása. A hevítőmikroszkópos vizsgálat során 320 °C-on a PP teljes mennyisége elpárolgott a felületről, azonban a derivatográfiás vizsgálat esetében a hőbontás egészen 480 °C-ig tart. A szakirodalmi adatokban is eltérést tapasztaltunk. D. Price és kutatótársai szerint a PP 330-410 °C közötti hőmérséklet tartományban bomlik, gyulladása 390-410 °C közötti hőmérséklet tartományban következik be [43]. Kicsit eltérően az előző eredményektől M.A. Ramazanov és kutatótársai 290-390 °C közötti tartományba helyezik a PP hőbomlását [44]. Argon atmoszférában történő vizsgálat esetén 400 °C feletti hőbomlásról [45], míg nitrogén atmoszférában lezajló kísérletek esetén 310 – 475 °C közötti hőmérséklet tartományról olvashatunk [46].



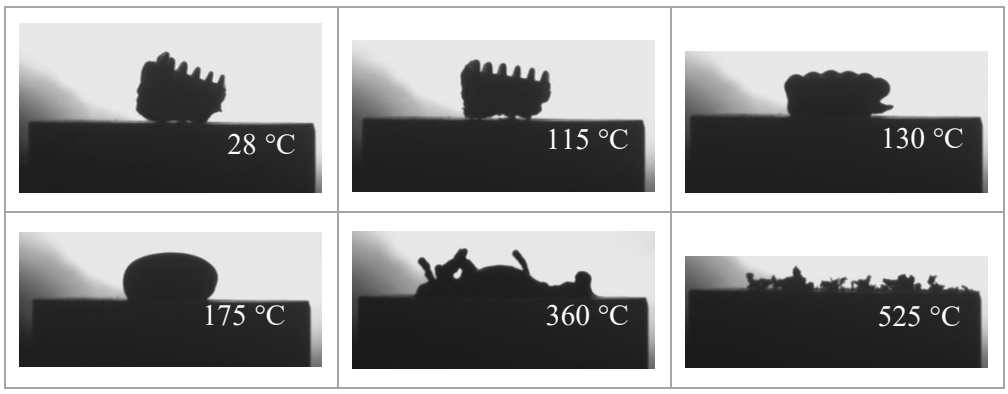
12. ábra: A HDPE minta derivatogramja, a minta tömegváltozásai és hő effektusai a hőmérséklet függvényében

A ***12. ábrán*** a HDPE minta derivatogramjai láthatók. A DTA és DTG görbén feltüntetett nevezetes pontokhoz tartozó adatokat a ***6. táblázat*** tartalmazza. Látható, hogy az olvadási szakasz (1.-3. pont) és a műanyag hőbomlási szakasza (4.-6. pont) is körülbelül 25 perc alatt zajlik le.

6. táblázat: A ***12. ábra*** derivatogramjaiból kiolvasható adatok

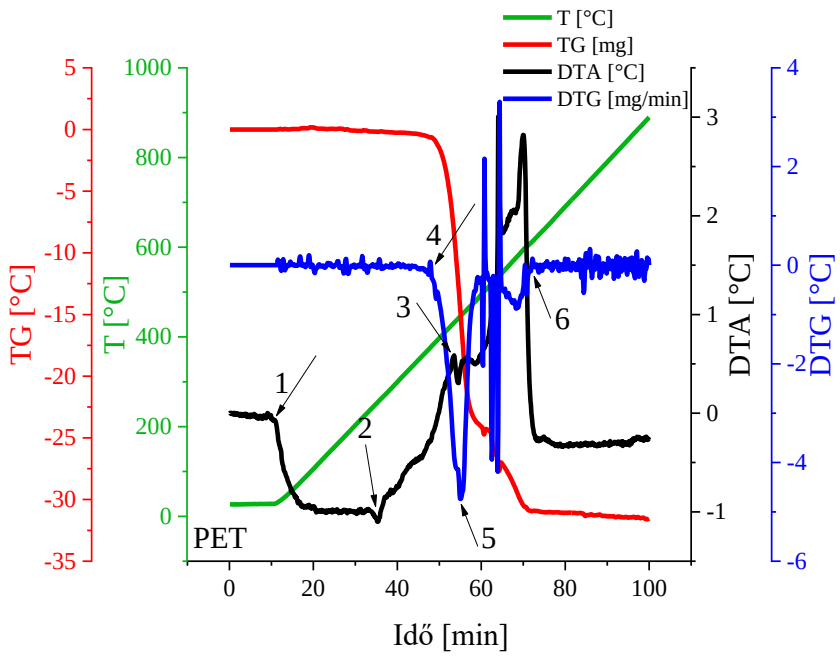
Visszamaradt anyag [% m/m]	Olvadási hőmérséklet tartománya [°C]	Legintenzívebb olvadási hőmérséklet [°C]	Hőbontás hőmérséklet tartománya [°C]	Legintenzívebb hőbontás hőmérséklet [°C]
65,69	25,47 – 270,92	143,05	358,17 – 527,85	493,32

A HDPE olvadási fázisait a ***13. ábra*** szemlélteti. A DTA görbe szerint a legintenzívebb olvadási hőmérséklet 143 °C körül található, a hevítőmikroszkópos vizsgálatok során ez a hőmérséklet körülbelül 130 °C-ra tehető. A szakirodalomban található adatok a kísérleteinkben kapott eredményekkel erősen korrelálnak, ugyanis is a 130-140 °C-os tartományba helyezik az olvadási pontot [40][41][47].



13. ábra: HDPE olvadási fázisai

270 °C-ig a HDPE elolvad (***6. táblázat***). A HDPE anyag esetében az olvadási és a hőbomlási tartomány között 90 °C különbség van. A hőbomlási szakasz 360 °C kezdődik meg és egészen 527 °C-ig tart (***6. táblázat*** és ***13. ábra***). Kiemelendő, hogy ***13. ábra*** 525 °C-os felvételén a maradék hamu látható a kerámia lapkán. A szakirodalomban nitrogén atmoszférában lejátszódó derivatográfiás kísérletekre találtunk példát, ahol a hőbomlás a 375-510 °C-os tartományba tehető [48][49][50], az intenzív hőbomlási hőmérséklet pedig 460-478 °C közé esik [48][49][51].



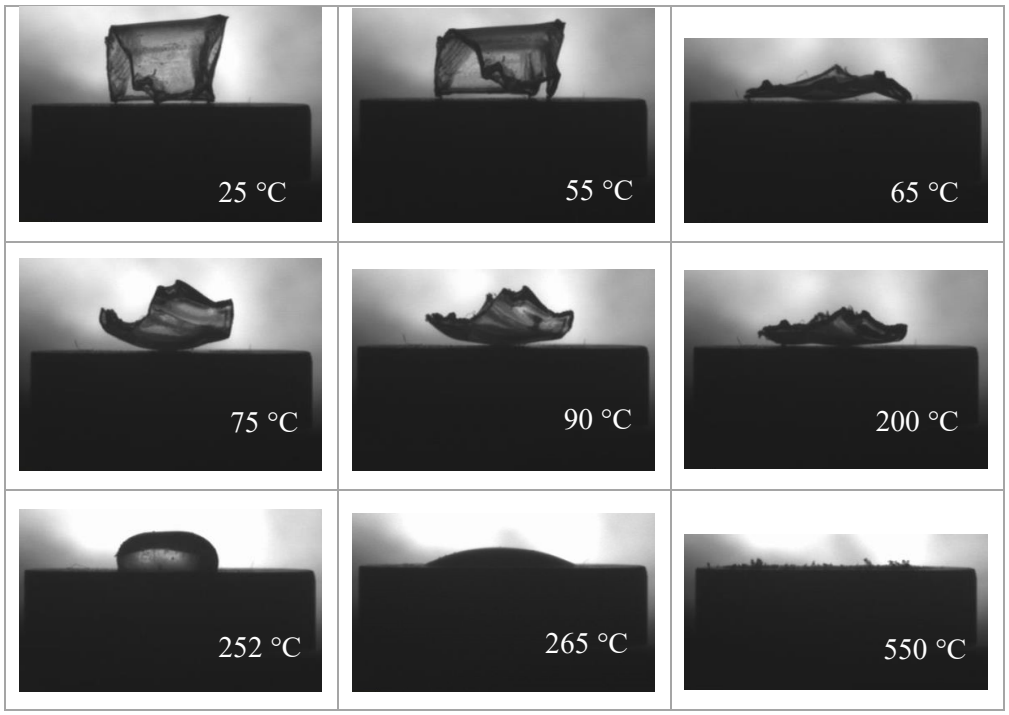
14. ábra: A PET minta derivatogramja, a minta tömegváltozásai és hő effektusai a hőmérséklet függvényében

Az ***14. ábrán*** a PET minta derivatogramjai láthatók. A DTA és DTG görbén feltüntetett nevezetes pontokhoz tartozó adatokat a ***7. táblázat*** tartalmazza. Látható, hogy az olvadási szakasz (1.-3. pont) 42 perc, míg a műanyag hőbomlási szakasza (4.-6. pont) 22 perc alatt zajlik le. Érdekességként megemlíthető, hogy az olvadási szakasz vége és a hőbomlási szakasz eleje egybeesik.

7. táblázat: A ***14. ábra*** derivatogramjaiból kiolvasható adatok

Visszamaradt anyag [% m/m]	Olvadási hőmérséklet tartománya [°C]	Legintenzívebb olvadási hőmérséklet [°C]	Hőbontás hőmérséklet tartománya [°C]	Legintenzívebb hőbontás hőmérséklet [°C]
69,45	28,23 – 432,07	255,18	387,56 – 603,58	447,72

A PET olvadási fázisait a ***15. ábra*** szemlélteti. A DTA görbe szerint a legintenzívebb olvadási hőmérséklet 255 °C körül található. Ez az érték egybeesik a hevítőmikroszkópos vizsgálatok során kapott adattal (252 °C; ***15. ábra***). A szakirodalomban található adatok a kísérleteinkben kapott eredményekkel erősen korrelálnak, ugyanis a 240-260 °C-os tartományba helyezik az olvadási pontot [40][41][52].



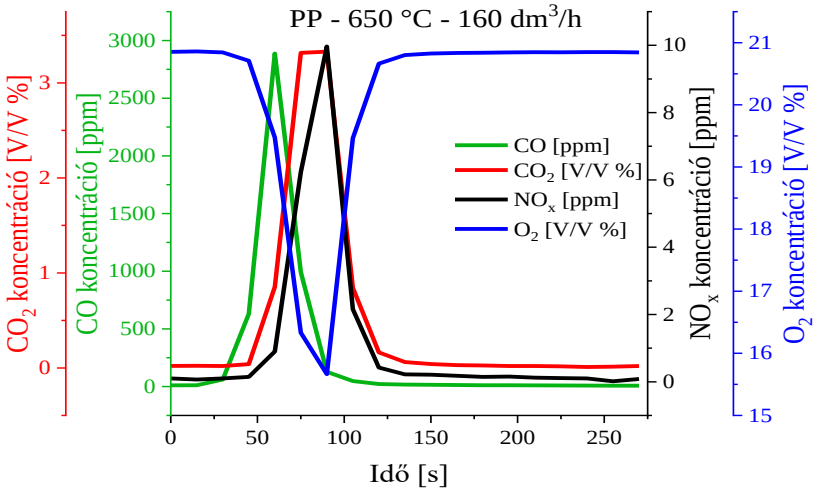
15. ábra: PET olvadási fázisai

430 °C-ig a PET elolvad (***7. táblázat***). A PET esetében a hőbomlási szakasz 387 °C-nál kezdődik meg és egészen 600 °C-ig tart (***7. táblázat*** és ***15. ábra***). Kiemelendő, hogy a ***15. ábra*** 550 °C-os felvételén a maradék hamu látható a kerámia lapkán. A szakirodalomban a levegő atmoszférában lejátszódó kísérletek esetében a hőbomlás kisebb hőmérséklet indul meg (325 °C [53] és 380 °C [54]), azonban atmoszféra jellegétől függetlenül a hőbomlás körülbelül 500 °C-ig tart [53][54][55][56].

4.2 Füstgáz komponens-koncentrációk alakulása műanyagok égése közben

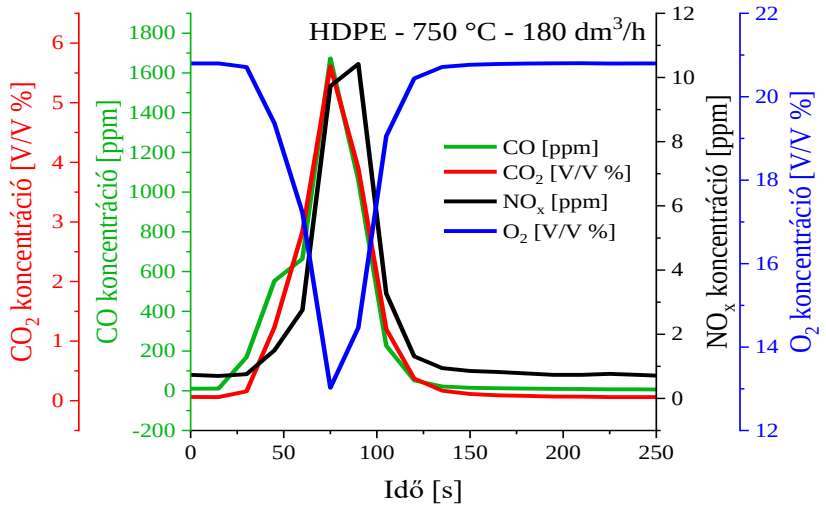
A kiválasztott műanyagok égetési vizsgálatai során azt szerettük volna megtudni, hogy a tűztér hőmérsékletének és az égési levegő térfogatáramának változása hogyan befolyásolja a képződött füstgáz komponensek mennyiségeit. Ehhez szisztematikusan háromféle hőmérsékleten (650 °C, 750 °C, 850 °C) és háromféle égési levegő térfogatáram (160 dm^3/h, 180 dm^3/h, 200 dm^3/h) mellett végeztük kísérleteinket, beállításonként 6-8 alkalommal. A következőkben bemutatjuk a legfontosabb megállapításainkat, de az összes diagramot a csatolt mellékletben közöljük.

A ***16. ábra*** a PP esetén 650 °C hőmérsékleten és 160 dm^3/h égési levegő térfogatáram mellett mutatja az égés során keletkező füstgáz komponens koncentrációk alakulását. A CO koncentráció vizsgálata során a csúcs a gyulladási szakaszt jelzi, amely során az illékony anyagok párolgásnak indulnak. Ebben a szakaszban a levegő és a tüzelőanyag első találkozása során gyors reakciómechanizmus révén CO képződik, ami egy exoterm folyamat. Az intenzív égés szakaszában a CO_2 és a NO_x koncentrációja is megnő. A CO_2 és NO_x koncentrációk maximumainál az O_2 koncentrációja a minimumom van. Tehát a gyulladási és az égési szakasz egyértelműen külön választható.



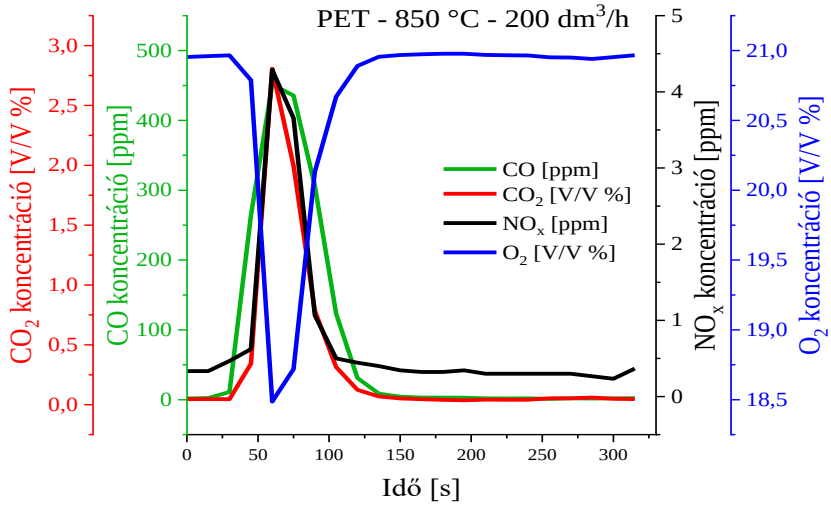
16. ábra: PP égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 650 °C; égési levegő térfogatáram: 160 dm^3/h)

A ***17. ábra*** a HDPE esetén 750 °C hőmérsékleten és 180 dm^3/h égési levegő térfogatáram mellett mutatja az égés során keletkező füstgáz komponens koncentrációk alakulását. A ***16. ábránál*** tett megállapítások a HDPE égése során is fennállnak, azzal a kis különbséggel, hogy 750 °C-on a gyulladási és az égési szakasz egybeesik.



17. ábra: HDPE égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 750 °C; égési levegő térfogatáram: 180 dm^3/h)

A ***18. ábra*** a PET esetén 850 °C hőmérsékleten és 200 dm^3/h égési levegő térfogatáram mellett mutatja az égés során keletkező füstgáz komponens koncentrációk alakulását. Összehasonlítva a ***17. ábrával*** (HDPE 750 °C – 180 dm^3/h) szinte ugyanazt a koncentráció alakulást figyelhetjük meg: a CO, CO_2, és NO_x szinte együttesen emelkednek, majd elérve a maximális koncentráció értékeiket csökkenésnek indulnak meg, és ezen csökkenésük is összehangoltnak látszódik. Ezzel a jelenséggel szemben az O_2 koncentráció változása fordítottan arányosnak hat.

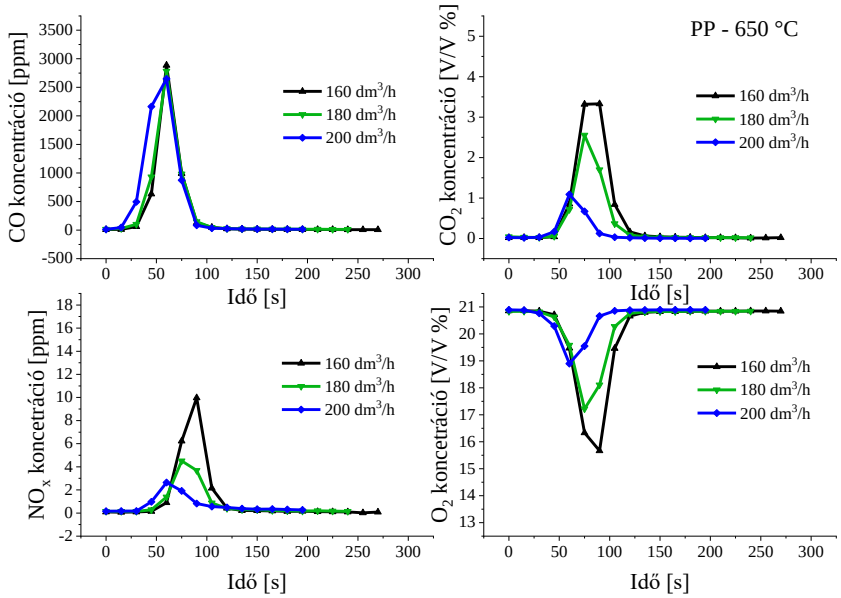


18. ábra: PET égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 850 °C; égési levegő térfogatáram: 200 dm^3/h)

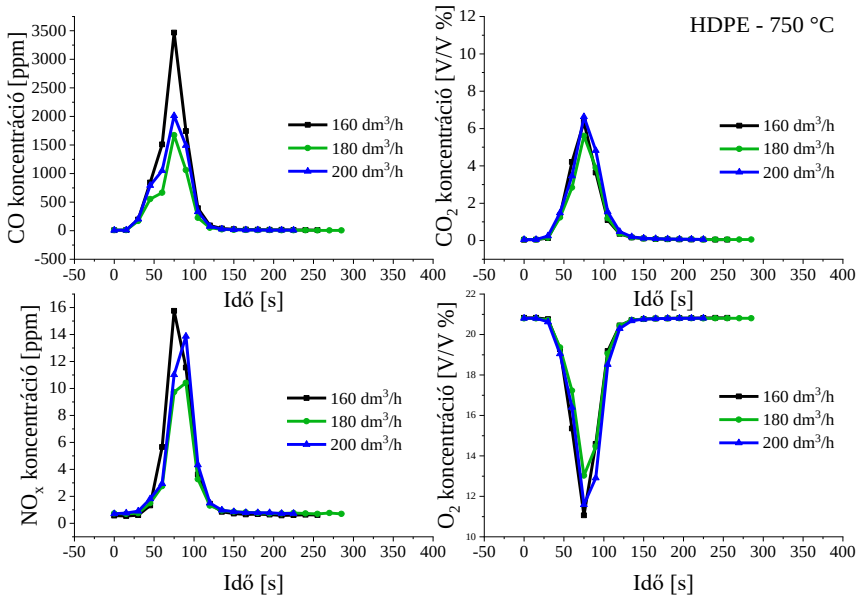
4.3 Égési levegő térfogatáram változtatásának hatása a füstgáz komponens koncentrációkra

A ***19. ábrán*** a PP 650 °C hőmérsékleten és különböző égési levegő térfogatáramok melletti égetése során láthatjuk a keletkező füstgáz komponensek mennyiségeit. A CO komponens koncentráció változása az égési levegő térfogatáramok növelésével kis mértékű csökkenést mutat. A CO_2, NO_x és O_2 koncentrációknál is megfigyelhető, hogy a térfogatáram növelésével csökken a koncentráció mennyisége.

A ***20. ábrán*** a HDPE 750 °C hőmérsékleten és különböző égési levegő térfogatáramok melletti égetése során láthatjuk a keletkező füstgáz komponensek mennyiségeit. A CO komponens koncentráció változása a térfogatáramok növelésével jobban megfigyelhető, bár a legkisebb CO koncentráció kibocsájtása a 180 dm^3/h térfogatáramnál volt. 750 °C-on a CO_2 koncentrációja közel állandó marad a 3 különböző térfogatáram változtatásának hatására. A HDPE 750 °C-on történő égetése során a 180 dm^3/h-nál lesz minimális CO, CO_2 és NO_x füstgáz komponensek kibocsátása és maximális O_2 füstgáz komponens koncentrációja.

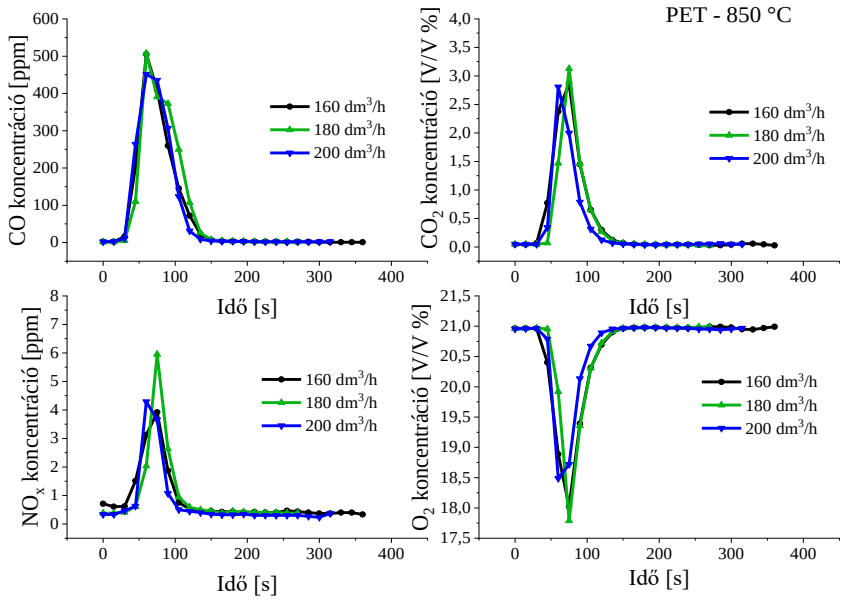


19. ábra: PP égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 650 °C; égési levegő térfogatáram: 160-180-200 dm^3/h)



20. ábra: HDPE égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 750 °C; égési levegő térfogatáram: 160-180-200 dm^3/h)

A ***21. ábrán*** a PET 850 °C hőmérsékleten és különböző égési levegő térfogatáramok melletti égetése során láthatjuk a keletkező füstgáz komponensek mennyiségeit. A PET égetése során megfigyelhető, hogy a CO komponensek mennyisége a levegőáramlás sebességével csökkent.



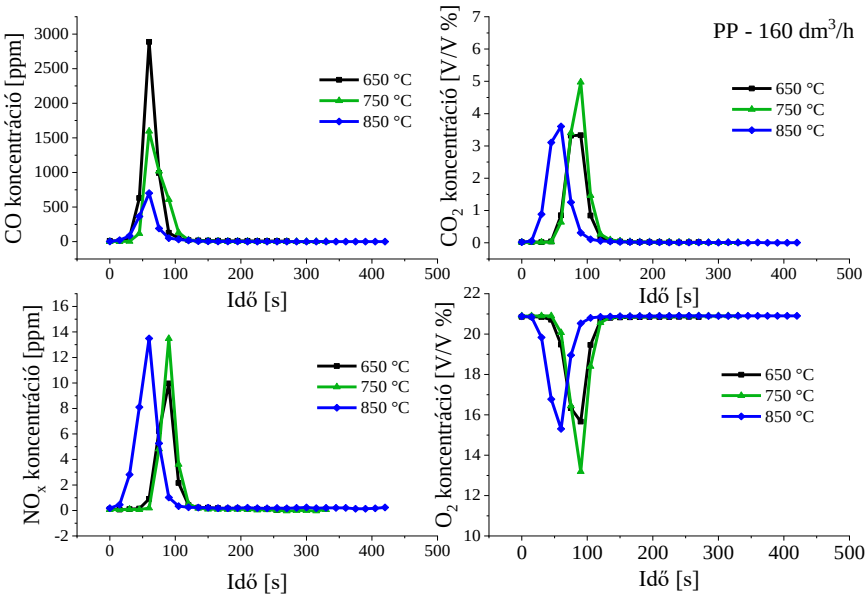
21. ábra: PET égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 850 °C; égési levegő térfogatáram: 160-180-200 dm^3/h)

4.4 Tűztér hőmérséklet változtatásának hatása a füstgáz komponens koncentrációkra

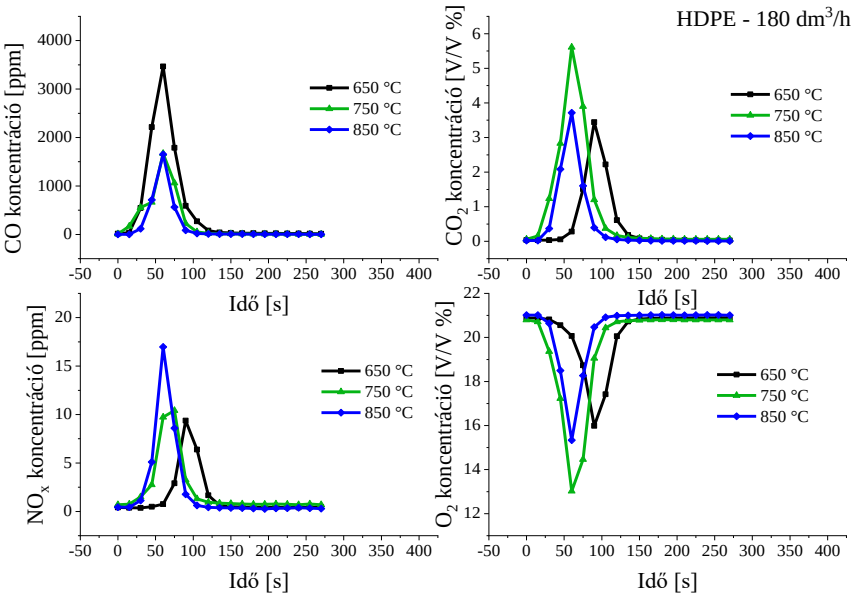
A ***22. ábra*** a PP esetén, fix (160 dm^3/h) égési levegő térfogatáram mellett mutatja a hőmérséklet változtatások hatására létrejövő füstgáz komponens koncentrációk alakulását.

Megállapítható, hogy a tűztér hőmérsékletének növelésével a CO füstgáz komponens mennyisége csökken, ugyanakkor a többi komponens (CO_2, NO_x és O_2) mennyiségei növekednek. Ugyanazon égési levegő térfogatáramnál a 850 °C-os kemencetér hőmérsékleten az égés sokkal hamarabb végbement, mint a 650 -, illetve a 750 °C-on.

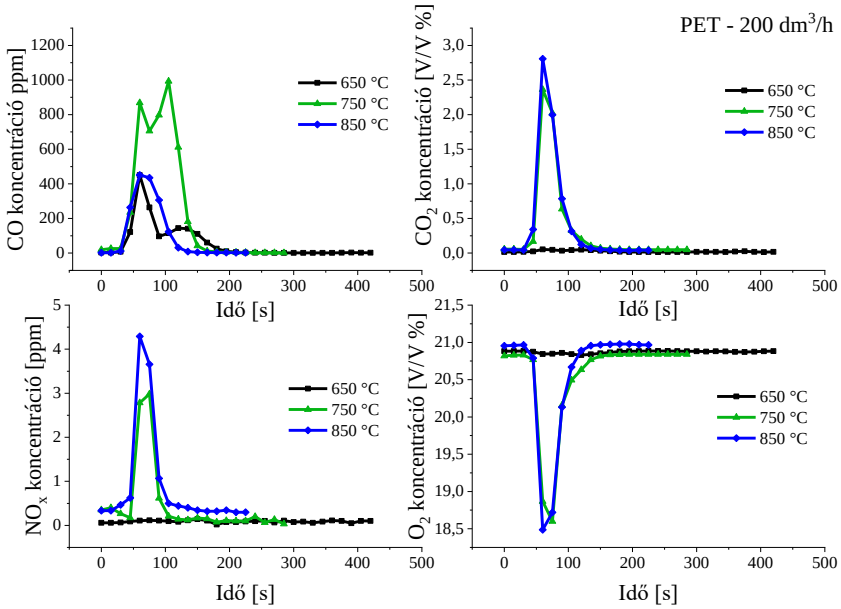
A ***23. ábra*** a HDPE esetén, fix (180 dm^3/h) égési levegő térfogatáram mellett mutatja a hőmérséklet változtatások hatására létrejövő füstgáz komponens koncentrációk alakulását. Itt is megfigyelhető az, ami az előző ***22. ábrán*** a PP-nél, hogy a tűztér hőmérsékletének csökkenésével a CO koncentráció mennyisége csökken, illetve alacsonyabb hőmérsékleten később kezdődik el az intenzív égés szakasza.



22. ábra: PP égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 650-750-850 °C; égési levegő térfogatáram: 160 dm^3/h)



23. ábra: HDPE égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 650-750-850 °C; égési levegő térfogatáram: 180 dm^3/h)



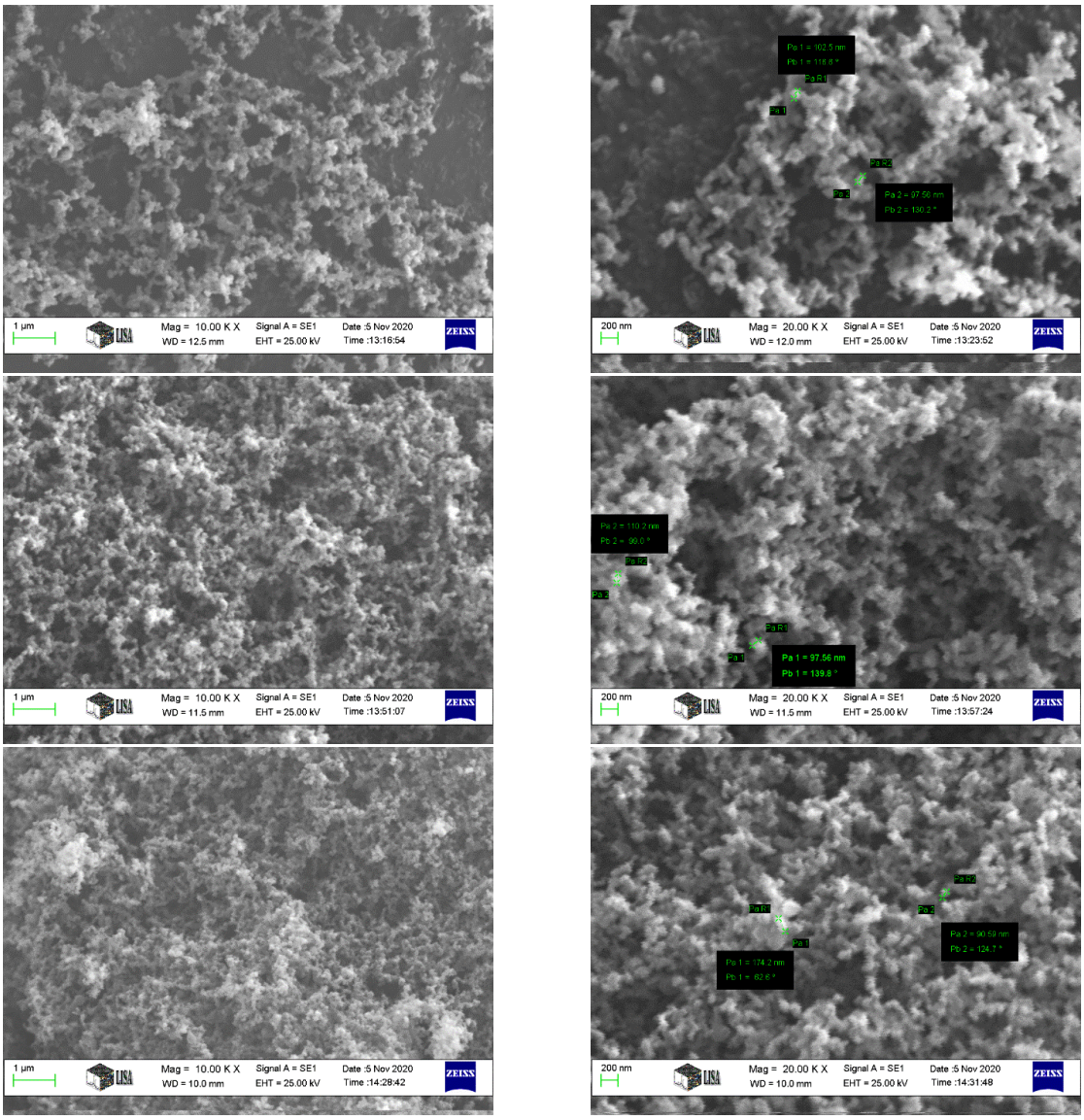
24. ábra: PET égetése során a füstgáz komponens-koncentrációk alakulása (kemencetér hőmérséklet: 650-750-850 °C; égési levegő térfogatáram: 200 dm^3/h)

A ***24.* ábra** a PET esetén, fix (200 dm^3/h) égési levegő térfogatáram mellett mutatja a hőmérséklet változtatások hatására létrejövő füstgáz komponens koncentrációk alakulását. Látható, hogy 650 °C hőmérsékleten a CO_2, NO_x, és az O_2 komponensek koncentrációi szinte

állandó értéken maradnak az égés kezdetétől egészen az égés befejezéséig. A másik két hőmérsékleten hasonló a görbék lefutása, de meg kell említenünk, hogy a CO komponens esetében két csúcs látható a görbén.

4.5 Füstgáz szilárd komponenseinek pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata

A füstgáz szilárd komponenseinek összetételének és morfológiájának vizsgálatát pásztázó elektronmikroszkóp segítségével valósítottuk meg. A ***25. ábra*** a HDPE égetéséből származó szilárd részecskék pásztázó elektronmikroszkópos felvételét tartalmazza (égési levegő térfogatárama 180 dm^3/h).



25. ábra: A HDPE minta 650, 750 és 850 °C-on történő égése során keletkezett füstgáz szilárd komponenseinek felvétele (M=10 000, 20 000)

A 10 000-es nagyításon látható, hogy nagyobb égetési hőmérsékleten a szemcsék kisebbek lesznek, a por szemcseszerkezete finomabbá válik, míg a szemcsék egymáshoz kapcsolódása „sűrű-hálós" jellegű lesz. A 20 000-os nagyításból és az ***8. táblázatból*** megállapítható, hogy bár a szemcseszerkezet finomodik, helyenként nagyobb szemcsék is felbukkannak (HDPE-850 °C: 125 nm). Tehát a legkisebb és legnagyobb szemcsék közötti differencia növekszik. A nagyobb

szemcsék létrejötte feltehetően a finomabb szemcsék összetapadásával (agglomerációjával) magyarázható.

A ***8. táblázatban*** látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével csökken a szemcsék karbontartalma, illetve nő az oxigéntartalma. Ez azzal magyarázható, hogy magasabb hőmérsékleten több karbon szemcse ég el. Érdekességképpen megemlítendő, hogy 850 °C-on a mintákban megjelenik a Si. A Si megjelenése L. Liu és társai [57], valamint L. Tumolva [58] és társai által végzett műanyag égetésből származó szilárd részecske vizsgálatban is megjelenik.

8. táblázat: A ***25. ábra*** felvételein látható területek elemi összetétele és a jellemző részecskeméretek

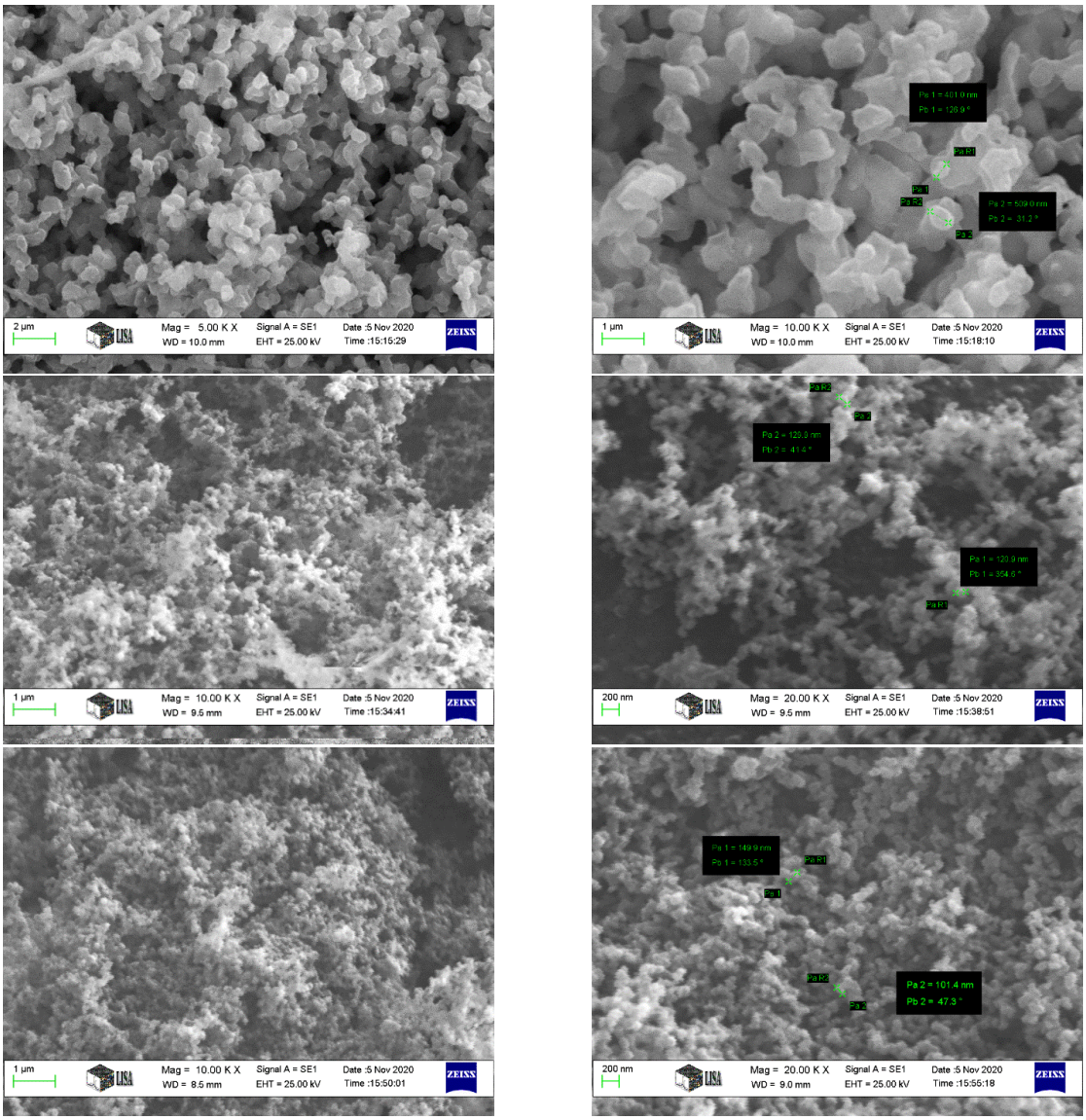
Minta neve	Komponens [% m/m]			Részecske méret [nm]	
	C	O	Si	1.	2.
HDPE – 650 °C	95,71	4,29	-	102,5	97,56
HDPE – 750 °C	85,12	14,88	-	110,2	97,56
HDPE – 850 °C	84,63	13,02	2,35	125,7	81,02

A ***26. ábra*** a PET égetéséből származó szilárd részecskék pásztázó elektronmikroszkópos felvételét tartalmazza (égési levegő térfogatárama 180 dm^3/h). Ugyanúgy, mint a HDPE esetében a hőmérséklet emelkedésével a szemcsék kisebbek lesznek, a szemcseszerkezet finomabbá válik, míg a szemcsék egymáshoz kapcsolódása „sűrű-hálós” jellegű lesz. Azonban a PET esetében a szemcseméret-csökkenés sokkal drasztikusabban történik, mint a HDPE esetében.

A ***26. ábra*** és a ***9. táblázat*** alapján jelen esetben is megállapítható, hogy a legkisebb és legnagyobb szemcsék közötti differencia a hőmérséklet növekedésével növekszik. A nagyobb szemcsék létrejötte feltehetően ebben az esetben is a finomabb szemcsék összetapadásával (agglomerációjával) magyarázható.

9. táblázat: A ***26. ábra*** felvételein látható területek elemi összetétele és a jellemző részecskeméretek

Minta neve	Komponens [% m/m/]		Részecskeméret [nm]	
	C	O	1.	2.
PET – 650 °C	69,67	30,33	401	509
PET – 750 °C	84,20	13,90	129,9	120,9
PET – 850 °C	86,14	13,86	149,9	101,4



26. ábra: A PET minta 650, 750 és 850 °C-on történő égése során keletkezett füstgáz szilárd komponenseinek felvétele (M=5000, 10 000, 20 000)

A műanyagok égetését B. E. Shemwell és társai is tanulmányozták. Kísérleteik során hasonló textúrájú szerkezeteket kaptak a különböző műanyagok égetéséből származó szilárd részecskék vizsgálatakor [59].

5 Összegzés

Napjainkban egyre nagyobb gondot jelent a folyamatosan és egyre nagyobb mennyiségben keletkező hulladék. Bár egyre többen foglalkoznak a hulladékok újrafelhasználásával és valamilyen módon történő hasznosításával, sajnos a jelentős környezetszennyezéssel járó, szabályozatlan hulladékégetés is jelen van. Különböző okok miatt hazánkban is sokan eltüzelik a háztartásukban „megtermelt" hulladékok éghető, égethető komponenseit.

A hulladékok között egyre nagyobb mennyiségben vannak jelen a különböző műanyagféleségek, melyek elégetése nemcsak a tüzelőberendezést károsítja, hanem a környezetre és az emberi egészségre is rendkívül káros hatással van.

Dolgozatunkban - mely az Energia és Minőségügyi Intézet egyik doktori kutatómunkájához is csatlakozik – azt vizsgáltuk, hogy a különböző műanyagfajták hogyan viselkednek különböző égetési feltételek (tűztér hőmérséklet, égési levegő mennyiség) mellett. Megállapításainkat a dolgozat részletesen tartalmazza, a legfontosabbakat az alábbiak szerint foglalhatjuk össze:

- A három vizsgált műanyag (polipropilén, polietilén és polietilén-tereftalát) 67-83 m/m % C tartalommal rendelkezik és ennek megfelelően - elsősorban a PP és a HDPE – a jó minőségű szenekhez hasonló fűtőértékű. A tüzeléstechnikai paraméterekre kapott mérési eredményeink jól korrelálnak az irodalmi adatokkal.
- A lágyulási és termoanalitikai vizsgálatok kimutatták, hogy a hőbomlás PP esetében ~400 °C-ig , HDPE esetében 530 °C-ig, a PET esetében pedig 600 °C-ig befejeződik. Égetési kísérleteink ehhez képest nagyobb hőmérsékleteken voltak, a kerámia mintatartó csónakból gyakorlatilag nyomtalanul eltűntek a minták.
- PP esetében az égetési kísérleteknél különválik egy ún. gyulladási és egy égési szakasz.
- PP és PET égetése esetén az égési levegő térfogatáramának növelésével csökken a füstgáz komponensek koncentrációinak mennyisége. HDPE esetében a minimum pont 180 dm^3/h-nál jelentkezik.
- PP és HDPE esetében a tűztér hőmérsékletének növelésével a CO füstgáz komponens mennyisége csökken, ugyanakkor a többi komponens (CO_2, NOx és O_2) mennyiségei növekednek. PET esetében CO_2, NOx, és az O_2 komponensek koncentrációi szinte állandó értéken maradnak az égés kezdetétől egészen az égés befejezéséig és a CO komponens esetében két csúcs látható a görbén.
- A keletkező füstgáz szilárd részecskéit megvizsgálva az látható, hogy nagyobb égetési hőmérsékleten a gömbszerű szemcsék kisebbek lesznek, a por szemcseszerkezete

finomabbá válik, a szemcsék egymáshoz kapcsolódnak és „sűrű-hálós” jellegű szerkezet alakul ki. A szemcseméret csökkenés PET esetén sokkal drasztikusabb. Eredményeink ebben az esetben is jól korrelálnak az irodalmi adatokkal.

Az elvégzett kutatómunka számos folytatási lehetőséget rejt magában. Ismert, hogy a szilárd tüzelőanyagok (és így a hulladékok) égetése során keletkező füstgázok szilárd részecskéin különböző, karcinogén hatású, ún, PAH molekulák kötődnek meg, melyek így az emberi szervezetbe is bejuthatnak. Ezeknek a molekuláknak az azonosítása, mennyiségi és minőségi elemzése egy további feladat lehet. Ezek mellett további hulladékfrakciók hasonló vizsgálatai tehetik teljesebbé a témával kapcsolatos ismereteinket.

Köszönetnyílvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazonazon személyeknek, akik hozzájárultak ennek a TDK munkának a létrejöttéhez:

Konzulenseinknek, Dr. Póliska Csaba tanár úrnak a kitüntető bizalmáért és segítségéért, valamint Mentes Dórának a mérések elvégzése során nyújtott szakmai iránymutatásáért, valamint a kiértékelések elkészítéséhez kapott jótanácsaiért.

Szeretnénk köszönetet mondani továbbá Kovács Árpádnak a minták pásztázó elektronmikroszkóp segítségével történő elemzéséért és végül, de nem utolsó sorban Koós Tamásnak az elemanalízis vizsgálat elvégzéséért.

Irodalomjegyzék

[1] Woldometer: Countries in the world by population (2020), https://www.worldometers.info/world-population/, [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[2] Fiona Harvey, 2019. 05. 14. The Guardian

https://www.theguardian.com/environment/2019/may/14/mismanaged-waste-kills-up-to-a-million-people-a-year-globally

[Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[3] Anda Angéla; Burucs Zoltán; Kocsis Tímea: Globális környezeti problémák és néhány társadalmi hatásuk 2009.

https://dtk.tankonyvtar.hu

[4] Légszennyező anyagok és üvegházhatású gázok kibocsátása (1985–), https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ua002d.html [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[5] http://www.atlas.d-waste.com/ [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[6] https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317 [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[7] Tanmoy Karak, R. M. Bhagat & Pradip Bhattacharyya: Municipal Solid Waste Generation, Composition, and Management: The World Scenario 2011. Aug. 30.

[8] https://sensoneo.com/sensoneo-global-waste-index-2019/ [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[9] https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ur006b.html [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[10] https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ur007.html [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[11] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics

[Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[12] https://ec.europa.eu/environment/eco-innovation/projects/sites/eco-innovation-projects/files/projects/documents/separate_country_profiles.pdf [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]

[13] Jiří Horák et. al.: Composition of ashes from the combustion of solid fuels and municipal waste in households, 2019. febr. 15. VŠB-Technical University of Ostrava, Czech Republic

[14] http://www.nyf.hu/others/html/kornyezettud/szelektiv/eredet1.htm [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[15] Pukánszky Béla, Móczó János: Műanyagok Typotex Kiadó (2011) https://regi.tankonyvtar.hu/
[16] https://www.creativemechanisms.com/blog/eleven-most-important-plastics [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[17] https://ourworldindata.org/outdoor-air-pollution [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[18] Combustion and Flame Volume 13, Issue 5, October 1969, Pages 495-505 S.J.BurgeC.F.H.Tipper: The burning of polymers
[19] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/99/Polypropylene_isotactic_mini_trp.png [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[20] https://sites.psu.edu/rclcaggiano/2014/01/30/the-journey-of-the-plastic-bottle/ [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[21] https://www.youtube.com/watch?v=San3i9OyBCE [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[22] https://intl.siyavula.com/read/science/grade-12/organic-molecules/04-organic-molecules-07 [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[23] https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392015000500891 [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[24] https://www.differencebetween.com/difference-between-pvc-and-vs-hdpe/ [Hozzáférés dátuma: 2020.11.09.]
[25] Saját felvételek
[26] Todd Johnson: Learn the Basics of the Plastic Resin Polypropylene 2019. jan. 17. https://www.thoughtco.com/what-is-polypropylene-820365 [Hozzáférés dátuma: 2020.11.12.]
[27] http://www.vilaglex.hu/Kemia/Html/Polieten_.htm [Hozzáférés dátuma: 2020.11.12.]
[28] https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic [Hozzáférés dátuma: 2020.11.12.]
[29] Felkészülési tananyag a Miskolci Egyetem Tüzeléstan c. tantárgy laboratóriumi gyakorlatához: Szilárd energiahordozó fűtőértékének meghatározása
[30] Havancsák Károly, Dankházi Zoltán: Pásztázó elektronmikroszkópia, ELTE Anyagfizikai Tanszék http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf [Hozzáférés dátuma: 2020.11.12.]
[31] Hegyi J.: Biomassza fűtésű kazánban kialakuló tapadványok vizsgálata, Szakdolgozat, Miskolci Egyetem, 2016.

[32] Dr. Szemmelveisz T.né: Fás- és lágyszárú biomasszák tüzelhetőségi feltételeinek vizsgálata. Doktori (PhD) értekezés; Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Tüzeléstani és Hőenergia Tanszék, (2006) p. 100

[33] Hernádi K.: Nanokompozitok. Szegedi Tudományegyetem, (2012) https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0025_vegy_5/ch07s03.html, *Hozzáférés dátuma: 2020.11.10.*

[34] Termoanalítikai módszerek (Termoanalízis) https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/termoanalizis.pdf *Hozzáférés dátuma: 2020.11.10.*

[35] Laczkó L., Wojnárovitsné Dr. H. I., Fórizs K.: Anyagvizsgálati lehetőségek a SZIKKTI Labor Kft. – ben. SZIKKTI Labor Szilikátkémiai Anyagvizsgáló-Kutató Kft. Üvegipari Szakmai Konferencia Budapest, (2014) https://szte.org.hu/upload/Anyagvizsg%C3%A1lati%20lehet%C5%91s%C3%A9gek%20a%20SZIKKTI%20Labor%20Kft.%20-%20ben%20%5BKompatibilit%C3%A1si%20m%C3%B3d%5D.pdf *Hozzáférés dátuma: 2020.11.10.*

[36] Révész Márk: MISKOLC első faaparíték alapú, távfűtési hőközpontja tüzelőanyagainak vizsgálata. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék, Szakdolgozat, (2014) p. 46. http://docplayer.hu/18384098-Miskolci-egyetem-muszaki-anyagtudomanyi-kar-tuzelestani-es-hoenergia-intezeti-tanszek.html *Hozzáférés dátuma: 2020.11.10*

[37] H. Zhou, A. Meng, Y. Long, Q. Li, and Y. Zhang, “An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: Physical, chemical composition and heating value,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 36, pp. 107–122, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.024.

[38] L. Sørum, M. . Grønli, and J. . Hustad, “Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes,” Fuel, vol. 80, no. 9, pp. 1217–1227, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0016-2361(00)00218-0.

[39] G. Özsin and A. E. Pütün, “A comparative study on co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with polyethylene terephthalate, polystyrene, and polyvinyl chloride: Synergistic effects and product characteristics,” J. Clean. Prod., vol. 205, pp. 1127–1138, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.134.

[40] Mustafa Akay, Introduction to Polymer Science and Technology. Ventus Publishing ApS,

2012.

[41] M. A. Dalhat and H. I. Al-Abdul Wahhab, “Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia,” Int. J. Pavement Eng., vol. 18, no. 4, pp. 349–357, Apr. 2017, doi: 10.1080/10298436.2015.1088150.

[42] P. Phulkerd, S. Arayachukeat, T. Huang, T. Inoue, S. Nobukawa, and M. Yamaguchi, “Melting point elevation of isotactic polypropylene,” J. Macromol. Sci. Part B Phys., vol. 53, no. 7, pp. 1222–1230, Jul. 2014, doi: 10.1080/00222348.2014.895624.

[43] D. Price;, G. Anthony;, and P. Carty, “Introduction: polymer combustion, condensed phase pyrolysis and smoke formation,” in Fire Retardant Materials, A. R. Horrocks; and D. Price, Eds. Woodhead Publishing Limited, 2001, pp. 1–30.

[44] M. A. Ramazanov, A. S. Huseynova, N. A. Eyubova, and S. A. Abasov, “Thermal properties and changes in phase structure of PP+ MnO 2-based compositions,” Optoelectron. Adv. Mater. Commun., vol. 4, no. 12, pp. 2003–2007, 2010.

[45] E. Jakab, G. Várhegyi, and O. Faix, “Thermal decomposition of polypropylene in the presence of wood-derived materials,” J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 56, no. 2, pp. 273–285, 2000, doi: 10.1016/S0165-2370(00)00101-7.

[46] C. Longo, M. Savaris, M. Zeni, R. N. Brandalise, and A. M. C. Grisa, “Degradation study of polypropylene (PP) and Bioriented polypropylene (BOPP) in the environment,” Mater. Res., vol. 14, no. 4, pp. 442–448, Oct. 2011, doi: 10.1590/S1516-14392011005000080.

[47] G. Madhu, H. Bhunia, P. K. Bajpai, and V. Chaudhary, “Mechanical and morphological properties of high density polyethylene and polylactide blends,” J. Polym. Eng., vol. 34, no. 9, pp. 813–821, Dec. 2014, doi: 10.1515/polyeng-2013-0174.

[48] S. Kumar and R. K. Singh, “Thermolysis of High-Density Polyethylene to Petroleum Products,” J. Pet. Eng., vol. 2013, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1155/2013/987568.

[49] R. Banat and M. M. Fares, “Thermo-Gravimetric Stability of High Density Polyethylene Composite Filled with Olive Shell Flour ,” Am. J. Polym. Sci., vol. 5, no. 3, pp. 65–74, 2015, doi: 10.5923/j.ajps.20150503.02.

[50] N. A. Eyubova, M. M. Kuliev, R. S. Ismayilova, and A. P. Abdullaev, “Derivatographic studies of polyethylene containing a dispersed semiconductor,” Surf. Eng. Appl. Electrochem., vol. 47, no. 3, pp. 253–255, Jun. 2011, doi: 10.3103/S1068375511030112.

[51] S. Kumar and R. K. Singh, “Pyrolysis Kinetics of Waste High- density Polyethylene using Thermogravimetric Analysis,” Int. J. ChemTech Res., vol. 6, no. 1, pp. 131–137, 2014, Accessed: Nov. 09, 2020. [Online]. Available: http://www.sphinxsai.com/framesphinxsaichemtech.htm.

[52] K. M. Akato, N. A. Nguyen, P. V. Bonnesen, D. P. Harper, and A. K. Naskar, “Recycling Waste Polyester via Modification with a Renewable Fatty Acid for Enhanced Processability,” ACS Omega, vol. 3, no. 9, pp. 10709–10715, Sep. 2018, doi: 10.1021/acsomega.8b00598.

[53] S. A. Jabarin and E. A. Lofgren, “Thermal stability of polyethylene terephthalate,” Polym. Eng. Sci., vol. 24, no. 13, pp. 1056–1063, Sep. 1984, doi: 10.1002/pen.760241311.

[54] J. M. Miranda Vidales, L. Narváez Hernández, J. I. Tapia López, E. E. Martínez Flores, and L. S. Hernández, “Polymer mortars prepared using a polymeric resin and particles obtained from waste pet bottle,” Constr. Build. Mater., vol. 65, no. 65, pp. 376–383, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.114.

[55] M. G. Faraj, K. Ibrahim, and M. K. M. Ali, “PET as a plastic substrate for the flexible optoelectronic applications,” Optoelectron. Adv. Mater. Commun., vol. 5, no. 8, pp. 879–882, 2011.

[56] H. M. Pires, L. C. Mendes, S. P. Cestari, and V. J. R. R. Pita, “Effect of weathering and accelerated photoaging on pet/pc (80/20 wt/wt%) melt extruded blend,” Mater. Res., vol. 18, no. 4, pp. 763–768, Jul. 2015, doi: 10.1590/1516-1439.010115.

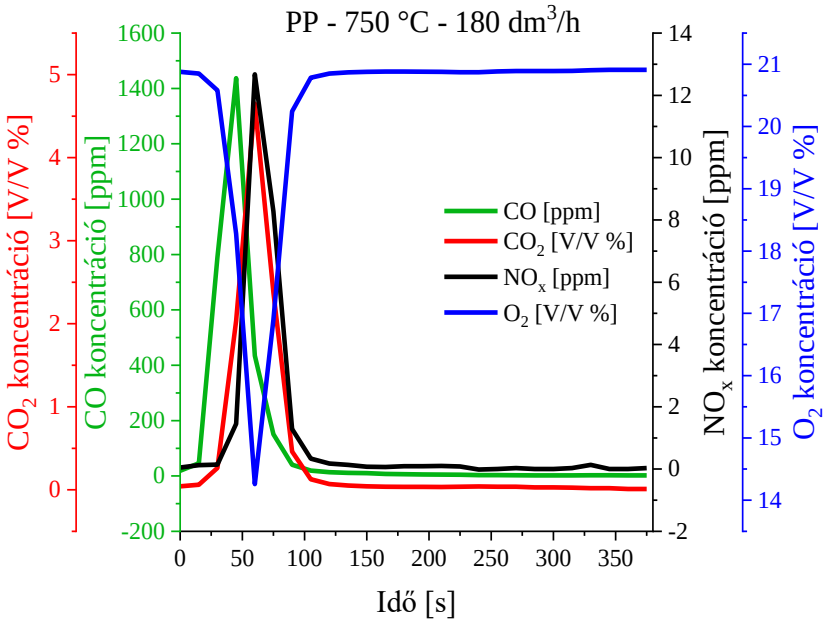
[57] L. Liu et al., “Morphology, composition, and mixing state of primary particles from combustion sources - Crop residue, wood, and solid waste,” Sci. Rep., vol. 7, no. 1, pp. 1–15, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-05357-2.

[58] L. Tumolva et al., “Morphological and elemental classification of freshly emitted soot particles and atmospheric ultrafine particles using the TEM/EDS,” Aerosol Sci. Technol., vol. 44, no. 3, pp. 202–215, Mar. 2010, doi: 10.1080/02786820903518907.

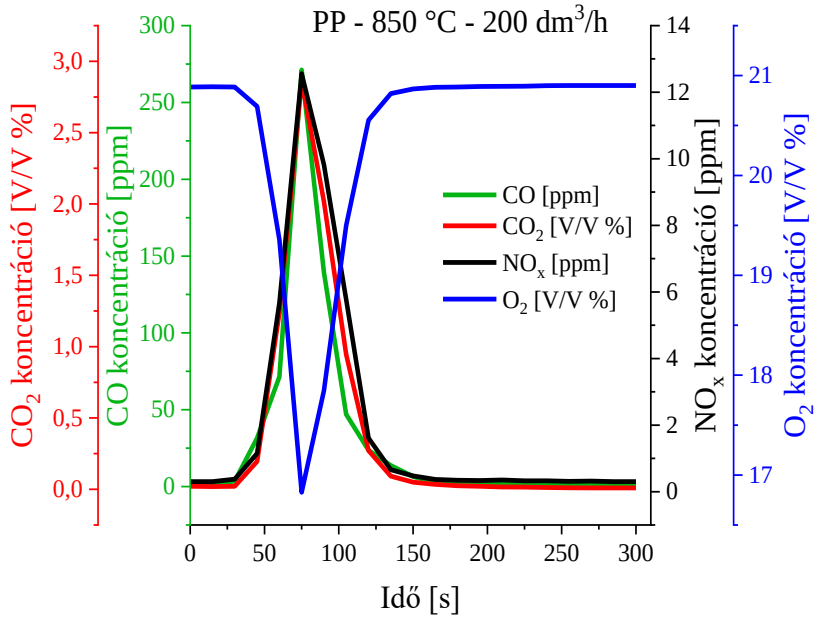
[59] B. E. Shemwell and Y. A. Levendis, “Particulates generated from combustion of polymers (plastics),” J. Air Waste Manag. Assoc., vol. 50, no. 1, pp. 94–102, 2000, doi: 10.1080/10473289.2000.10463994.

MELLÉKLET

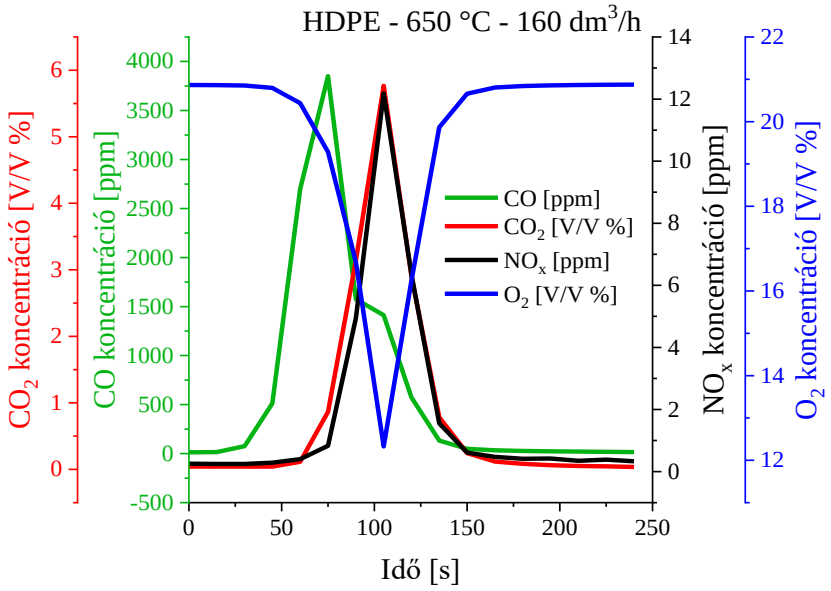
M1-Füstgáz komponens-koncentrációk alakulása műanyagok égése közben



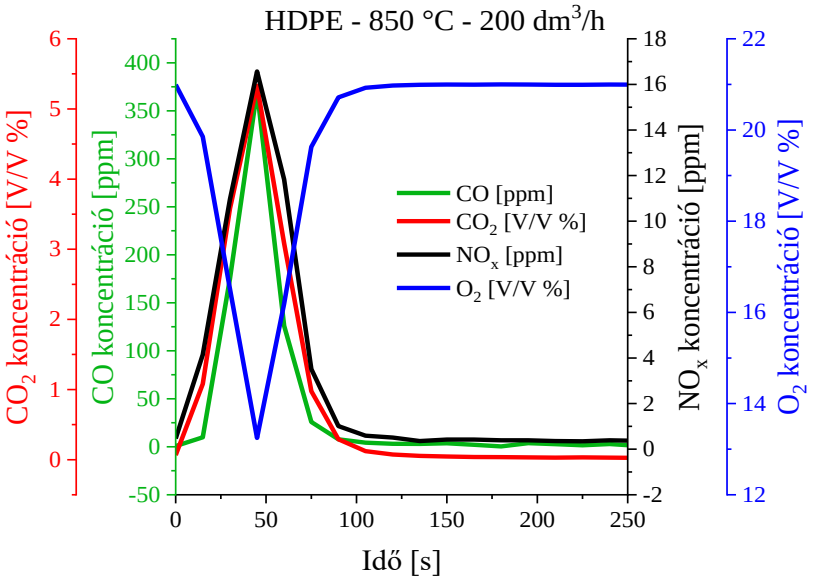
M1-1. ábra: Polipropilén 750 °C hőmérsékleten és 180 dm^3/h hőáram sebességen történő égetésének füstgáz komponens-koncentrációjának alakulása



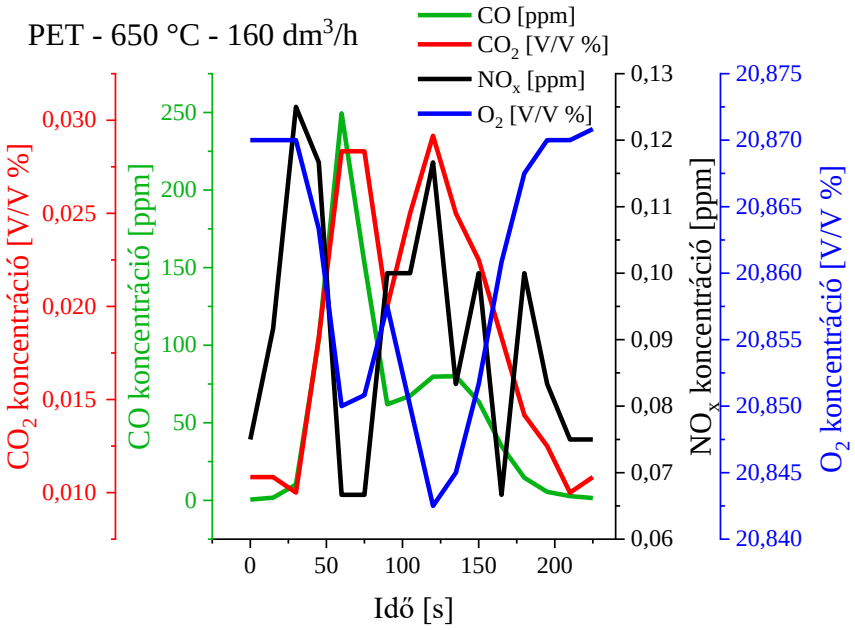
M1-2. ábra: Polipropilén 850 °C hőmérsékleten és 200 dm^3/h hőáram sebességen történő égetésének füstgáz komponens-koncentrációjának alakulása



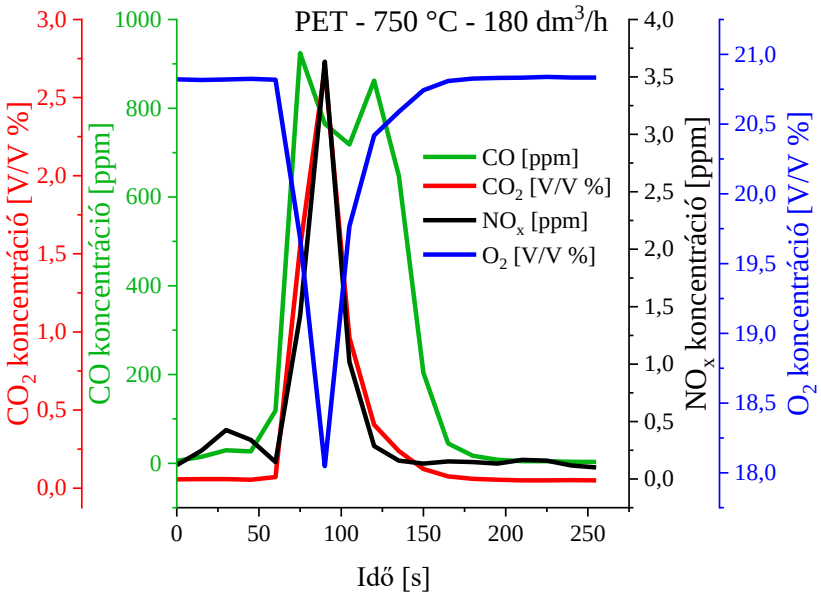
M1-3. ábra: HDPE 650 °C hőmérsékleten és 160 dm^3/h hőáram sebességen történő égetésének füstgáz komponens-koncentrációjának alakulása



M1-4. ábra: HDPE 850 °C hőmérsékleten és 200 dm^3/h hőáram sebességen történő égetésének füstgáz komponens-koncentrációjának alakulása

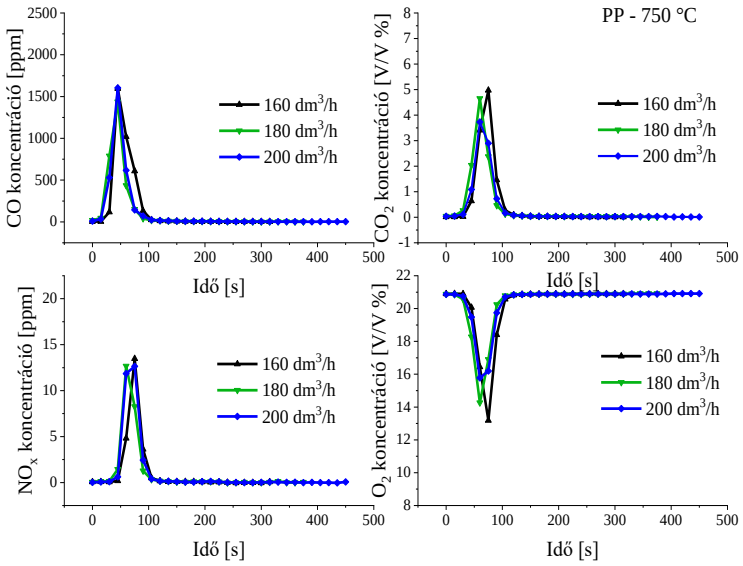


M1-5. ábra: PET 650 °C hőmérsékleten és 160 dm^3/h hőáram sebességen történő égetésének füstgáz komponens-koncentrációjának alakulása

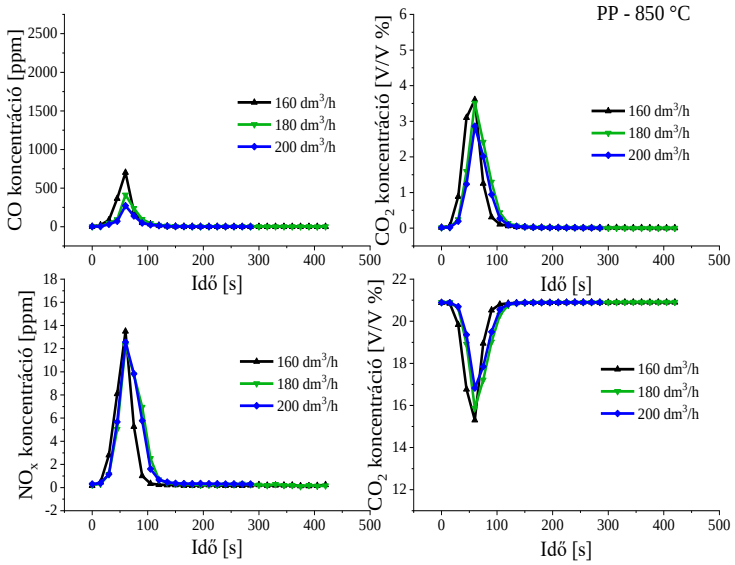


M1-6. ábra: PET 750 °C hőmérsékleten és 180 dm^3/h hőáram sebességen történő égetésének füstgáz komponens-koncentrációjának alakulása

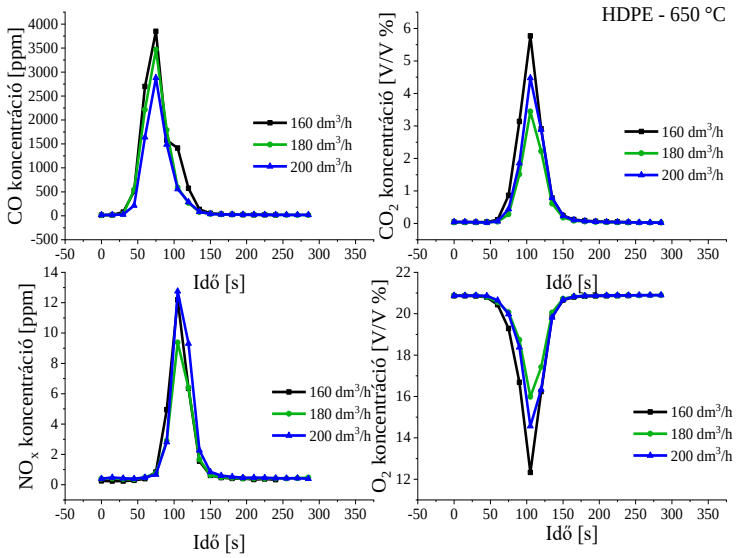
M2 - Égési levegő térfogatáram változtatásának hatása a füstgáz komponens koncentrációkra



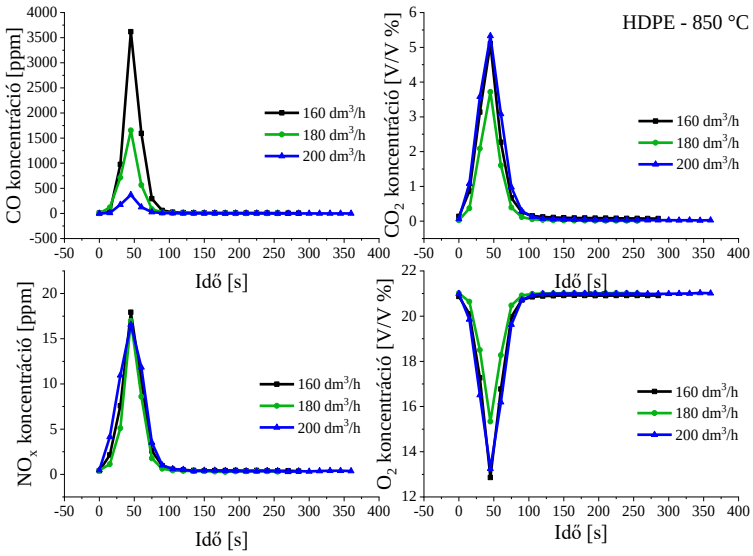
M2-1. ábra: Polipropilén 750 °C hőmérsékleten történő égetésénél és a különböző levegő térfogatáram változtatásoknál a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



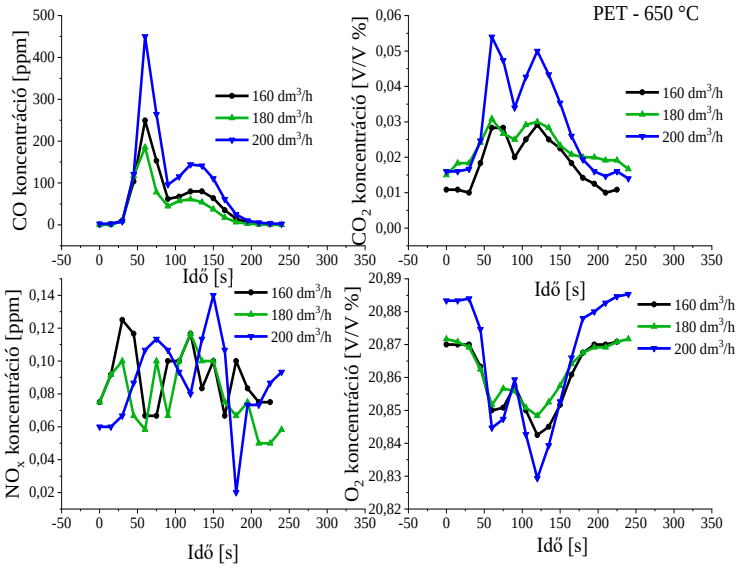
M2-2. ábra: Polipropilén 850 °C hőmérsékleten történő égetésénél és a különböző levegő térfogatáram változtatásoknál a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



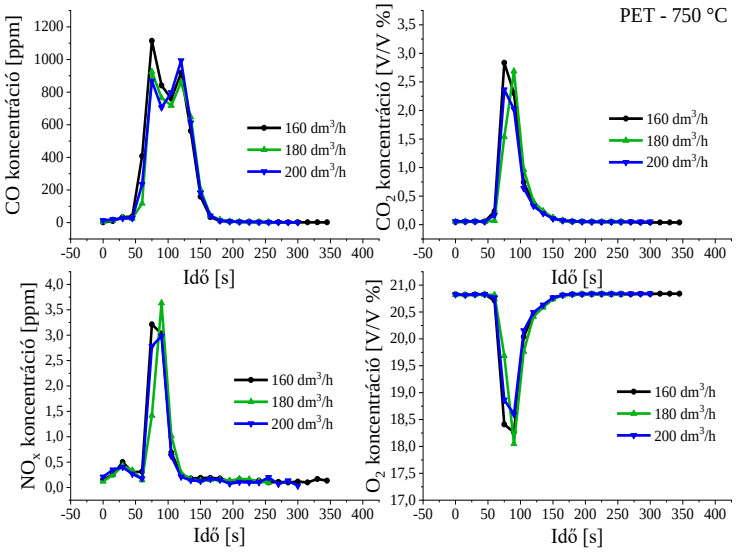
M2-3. ábra: HDPE 650 °C hőmérsékleten történő égetésénél és a különböző levegő térfogatáram változtatásoknál a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



M2-4. ábra: HDPE 850 °C hőmérsékleten történő égetésénél és a különböző levegő térfogatáram változtatásoknál a füstgáz komponens koncentrációk alakulása

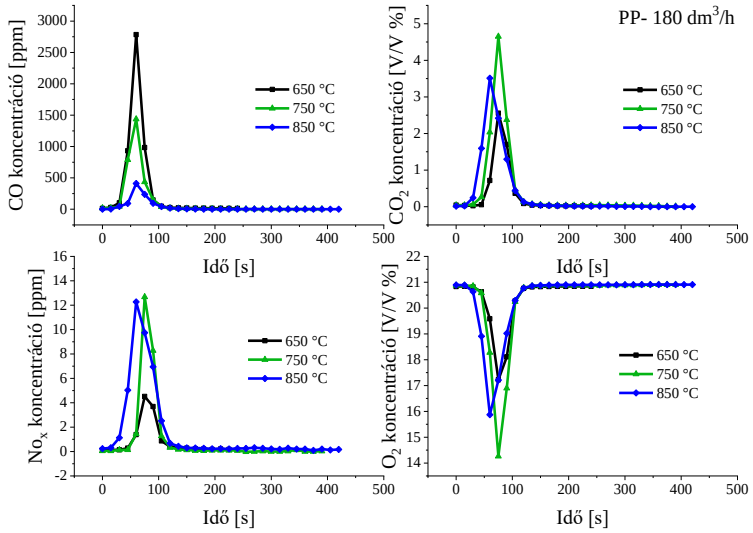


M2-5. ábra: PET 650 °C hőmérsékleten történő égetésénél és a különböző levegő térfogatáram változtatásoknál a füstgáz komponens koncentrációk alakulása

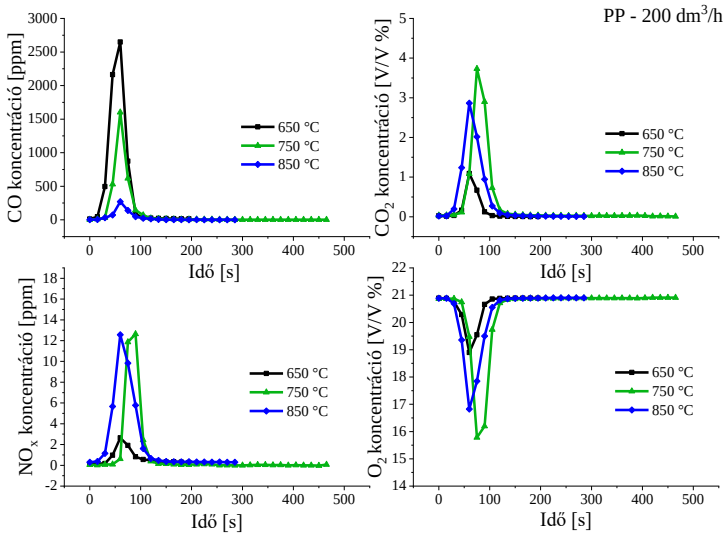


M2-6. ábra: PET 750 °C hőmérsékleten történő égetésénél és a különböző levegő térfogatáram változtatásoknál a füstgáz komponens koncentrációk alakulása

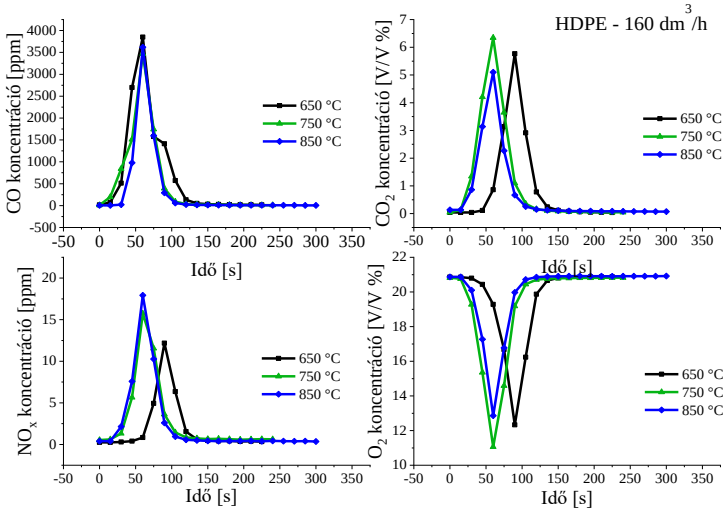
M3-Tűztér hőmérséklet változtatásának hatása a füstgáz komponens koncentrációkra



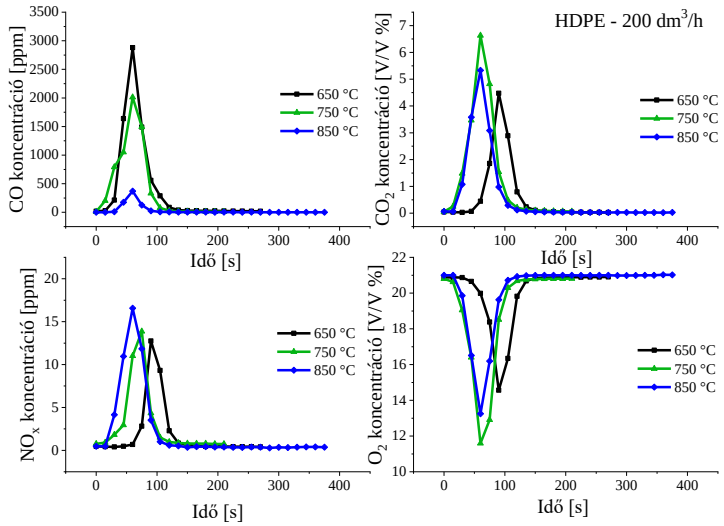
M3-1. ábra: Polipropilén 180 dm^3/h levegő térfogatáram égetése mellett és a hőmérséklet változtatások függvényében a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



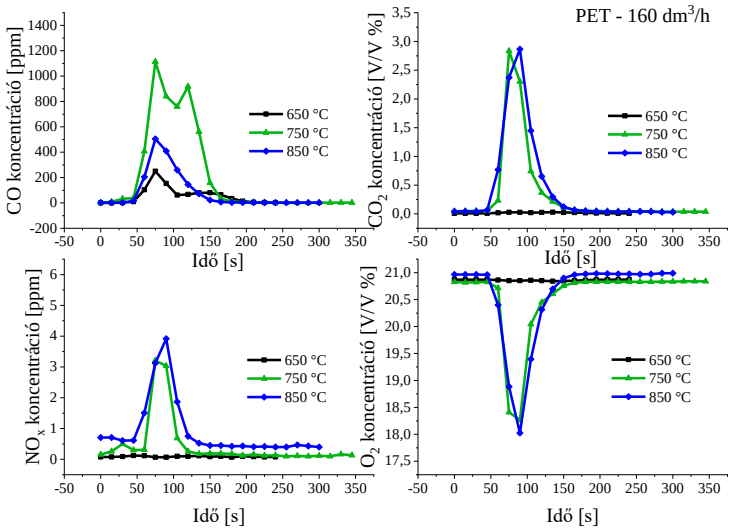
M3-2. ábra: Polipropilén 200 dm^3/h levegő térfogatáram égetése mellett és a hőmérséklet változtatások függvényében a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



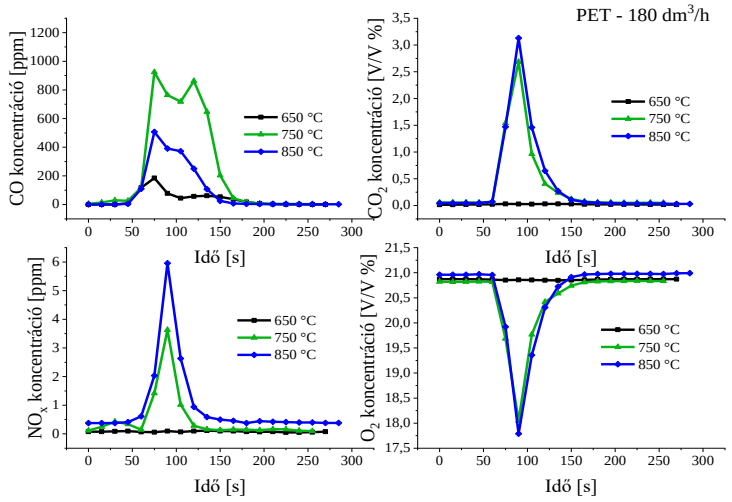
M3-3. ábra: HDPE 160 dm^3/h levegő térfogatáram égetése mellett és a hőmérséklet változtatások függvényében a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



M3-4. ábra: HDPE 200 dm^3/h levegő térfogatáram égetése mellett és a hőmérséklet változtatások függvényében a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



M3-5. ábra: PET 160 dm^3/h levegő térfogatáram égetése mellett és a hőmérséklet változtatások függvényében a füstgáz komponens koncentrációk alakulása



M3-6. ábra: PET 180 dm^3/h levegő térfogatáram égetése mellett és a hőmérséklet változtatások függvényében a füstgáz komponens koncentrációk alakulása