

Bányászat és kapcsolódó iparágak hulladékainak szerepe a körforgásos gazdaságban – Urban mining

Role of the wastes of mining and allied industries in the circular economy – Urban mining

Dr. MUCSI Gábor

Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar,
Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet, 3515- Miskolc, Egyetemváros, Magyarország,
gabor.mucsi@uni-miskolc.hu

Abstract

Research of the wastes of mining and allied industries at the University of Miskolc Faculty of Earth Science and Engineering has been carrying out in the Center of Excellence of Sustainable Natural Resource Management in the last decades very intensively. In the present paper the most important industrial wastes are summarized, namely coal mining gangue, fly ash, metallurgical slags, red mud and construction and demolition waste. Moreover, some utilization possibilities are shown briefly from circular economy point of view, i.e. eco-friendly binder, aggregate, cement supplementary material.

Kulcsszavak: bányászati hulladék, erőműi pernye, építési hulladék, építőipar, körforgásos gazdaság.

1. Bevezetés

A Föld egyre gyarapodó lakosságának folyamatosan növekvő energiaigénye hatására elsősorban a fejlődő országokban egyre több energetikai hulladék keletkezik a szénbányászat során és a szilárd tüzelésű erőművekben, javarészt bányászati meddő, erőműi pernye és salak, valamint füstgáz kéntelenítési gipsz. Egyes források szerint ezek évente keletkező mennyisége világviszonylatban eléri a 800 millió tonnát [1]. A fejlett országokban pedig jelentős mennyiség található ezen anyagokból deponált formában. Emellett hasonló volument tesz ki a vas és acélgyártási salak (600 millió tonna), és a különböző bányászati hulladékok. Ennek a világméretű problémának a megoldására az Európai Unió direktívái arra sarkallják a tudósokat, hogy új technológiákat és ezáltal nagy hozzáadott értékű termékeket fejlesszenek ki a fenti melléktermékekből, hulladékokból. Ezt mondja ki a közelmúltban elfogadott Körkörös Gazdaság (Circular Economy) modell is [2], amely egyik fő pontja a hulladékok hasznosítása. A szóban forgó melléktermék nyersanyagként történő hasznosítása az általa kiváltott elsődleges ásványkincseinkkel, nyersanyagainkkal történő racionális és fenntartható gazdálkodást jelentené. Végül, de nem utolsó sorban pedig a CO₂ kibocsátás csökkentéséhez is hozzájárul, mivel a kiváltandó elsődleges alapanyagokból előállított cement előállításakor jelentős mennyiségű CO₂ keletkezik. A tanulmány a Föld legnagyobb mennyiségben keletkező ipari hulladékait veszi számba és hasznosítási lehetőségeit ismerteti, elsősorban saját hazai kutatások eredményein keresztül, nevezetesen erőműi pernyére, vörösiszapra és acélgyártási salakra fókuszálva főként építőanyag ipari termék és technológia fejlesztés vonatkozásában.

2. Ipari hulladékok

2.1. Szénbányászati meddők

A bányameddők a technológiai folyamatban keletkező anyagok, amelyek alapvetően két helyen keletkeznek: (1) a bányaművelés során a külfejtéses vagy mélyművelésű bányászati tevékenység melléktermékeként, és a (2) nyers bányaközetek előkészítésekor a felhasználható közetek, ásványok, kémiai alkotók kinyerése maradékanyagként. A bányameddő az adott gazdasági körülmények között nem, vagy gazdaságosan nem hasznosítható mennyiségben tartalmazza azt az anyagot, amelyért a bányában

a termelés folyt, folyik. Ezen túlmenően megkülönböztethetünk érc-, szén- vagy nemfémes ásvány előkészítéséből származó meddőt.

Általános meddő felhasználási területek az alábbiak: nyers-meddőként közvetlenül feltöltési, üregkitöltési anyagként; megfelelő mértékű előkészítéssel, főként aprítás és osztályozás után, útépitési alépítmények - hordozóréteg, hidraulikus és aszfalt útalap – készítésekor adalékanyagaként, a cement- és téglaiipari, kerámiai ipari (mázok, töltőanyagok) másodnyersanyagaként, továbbá burkolólap-gyártás, mezőgazdasági talajjavító-anyag előállításakor nyersanyagaként; nagyobb mérvű átalakítást, előkészítést-nemesítést követően építőanyagként: mészsadalással szilikátblokkok, termikus kezeléssel könnyű granulátumok, valamint égetett téglák, lapok gyártásával; a hasznos komponensek kinyerésével eredeti célra másodnyersanyagként való hasznosítás: szénbánya-meddőkől az éghető szénszemcsék (Haldex), ércbányák meddőjéből a színes és nemesfémek - réz, cink, ólom ill. kobalt, nikkel, arany – kinyerésével; kísérő (pl. Ti, W, Co, Li, U) ásványok hasznosításával [3].



1. ábra

Körforgásos gazdaság koncepciója [6]

A szénbányászat és szénmosás következtében jelentős mennyiségű melléktermék, úgynevezett szén meddő keletkezik, amely a világ egyik legnagyobb mennyiségben keletkező ipari hulladéka. Az adatok szerint ez a kitermelt szén kb. 15-20 %-át teszi ki [4]. E típusú hulladék lerakása értékes területet von el más mezőgazdasági vagy ipari tevékenységtől, ill. komoly környezetvédelmi problémákat (pl. spontán égés miatti emisszió, kioldódás következtében talaj és vízszennyezés) okozhat. A szénbányászati meddő egyik előfordulási formája az ún. kiégett vörös meddő (salak). Külső tényezők hatására egyes hányókban öngyulladás következik be: a magas hőmérsékleten a szürke vasoxid vörössé válik, és közben a meddő geotechnikai tulajdonságai is jelentősen módosulnak. Salaknak minősülő vörös meddő sok (30-50 %) SiO_2 -t és Al_2O_3 -at, kevesebb (7 % körüli) Fe_2O_3 -at és kevés (1,5 % körüli) CaO -t és MgO -t tartalmaz.

2.2. Erőműi pernyék

A villamosenergia termelésében a széntüzelésű erőművek világszerte jelentős szerepet töltenek be. A kőolaj és földgáz után a harmadik helyen áll az energiaforrások sorában, de Ázsiában vannak olyan országok, ahol a szénelapú energiatermelés meghaladja az 50 %-ot, ugyanez az érték Európában és Észak-Amerikában kb. 18 %, Afrikában pedig 23 % körüli [5]. A szilárd égési maradványanyag durva része a kazán salak, amely a kazán alsó részén kerül kihordásra. A finom frakció pedig a füstgázzal együtt távozik a kazánból, amely egy mechanikai és/vagy elektrosztatikus porleválasztást követően kerül összegyűjtésre. A mechanikai porleválasztás eszköze lehet pl. az ülepitőkamra, a porciklon, az

örvénycsöves vagy a kerámiagyertyás pernyeleválasztó, melyek legtöbbször előleválasztó szerepet töltenek be, vagyis a pernye durvább és nehezebb szemcséit gyűjtik össze. Az elektrosztatikus porleválasztás eszközei a különböző kialakítású elektrofilterek, amelyekben a finomabb és könnyebb pernye szemcsék leválasztása történik. A nagy kéntartalmú szenek esetében a füstgázt ezt követően egy abszorberre vezetik, ahol legtöbbször mészkő zaggal (vagy mésztejjel) kéntelenítik. Ennek a folyamatnak a mellékterméke az ún. füstgáz kéntelenítési gipsz.

A pernye főként szilícium-oxidot, alumínium-oxidot és kisebb mennyiségű vas-oxidot, kalcium-, magnézium és mangán-oxidot tartalmaz. Fázisait tekintve elsősorban az üveges komponensek vannak túlsúlyban, de kristályos komponensei közül a mullit, a kvarc, a magnetit és a hematit is megtalálható. A kémiai és ásványos összetétel elsősorban attól függ, hogy milyen szén kerül elégetésre, illetve a szén lelőhelyén a szénen kívül milyen kőzetek fordulnak elő, de kiemelt jelentőséggel bír a szén előkészítése, az égetés módja, tüzeléstechnikai paraméterei és a szilárd részecskéknek a füstgáz áramából történő leválasztása.

2.3. Kohászati salakok

A kohászati salakok az ércek meddő alkotórészeinek, valamint a fémolvadékokból eltávolítandó nem kívánatos elemeknek folyékony állapotban keletkező, majd megdermedő keveréke. A salakok a vaskohászat működése során keletkező, nem a termelés célját jelentő anyagok döntő többségét (85-90%-át) teszik ki, így mennyiségük alapján törekedni kell minél teljesebb mértékű hasznosításukra [7].

A vaskohászati salakok keletkezésüktől függően az alábbi módon csoportosíthatók. (1) Nagyolvasztói salakok vagy kohosalakok: amelyek Ca-Al-Mg szilikátok, a bazalthoz hasonlóak, stabil szerkezet és kémiai összetétel, megfelelő szilárdság és nagy vastartalom jellemző őket. (2) Konverteres acélművi salakok: nagyobb CaO, kisebb SiO₂ tartalom, összetétel szélesebb határok közt változik, kezelendő a szabad CaO tartalom, ami duzzadást okozhat. Emiatt pihentetés szükséges (fél vagy 1 évig), vagy mesterséges öregítés (hőkezelés) válhat szükségessé. Szerkezete tömör, szilárdsága nagy. (3) Elektroacél-gyártási salakok: esetenként vízben oldható nehézfémeket tartalmaznak, ami felhasználási korlátot jelenthet. (4) Üstmetallurgiai salakok, az előzőhöz hasonlóan korlátok jelentkezhetnek [7, 8].

Az alapanyag és összetevőikön túl fontos elkülöníteni a salak előkészítésében kialakított különbségeket. Ilyen például a granulált kohosalak, amely előállítása során az olvadék salak egy gyors hűtésnek van kitéve, ezáltal a termék nem kristályos, hanem amorf szerkezettel fog rendelkezni, így reaktivitása nagyobb lesz. A cementipar számára értékes alapanyag állítható elő.

2.4. Vörösiszapok

Világviszonylatban 120 millió tonna vörösiszap keletkezik, valamint 2,7 milliárd tonna a lerakott iszap tömege, hazánkban kb. 50 millió tonna vörösiszap van, amelynek hasznosítása jelenleg nem megoldott. Lengyel és Lakatos [9] összefoglalta a vörösiszap hasznosításának lehetőségeit. Az építőiparban cementgyártásnál, téglá, blokk téglá építőelemek, geopolimerek előállításánál; vegyiparban katalizátorok, szorbensek, kerámiák, bevonatok, műanyag töltőanyagok, pigment gyártásánál; környezetvédelemben szennyezett és savas bányavizek, szennyezett talajok, savas füstgázok kezelésénél; mezőgazdaságban talajadalékként (pH beállítására); metallurgiában acélgyártáshoz, fém visszanyerésnél (mivel pl. a hazai vörösiszapokból vasat és alumíniumot lehet kinyerni). A vörösiszap alkalmazhatósága korlátozott köszönhetően magas vastartalmának, az alkálifémek jelenlétének és kis szemcseméretének. A felhasználását célzó korábbi kutatások téglá, kerámiák, cement, falicsempék készítésében és a fémkinyerésben vélték a probléma megoldását, azonban ezek egyike sem bizonyult járható útnak egy széles körben elfogadott technológia megvalósításában. A geopolimerizáció [10] egy potenciális hasznosítási lehetőséget kínál, mivel a vörösiszap Al₂O₃-at, SiO₂-t és marónátront tartalmaz, amelyek a geopolimerizáció szempontjából fontosak. Geopolimerbe történő befoglalás esetén a vörösiszapban lévő toxikus anyagok stabilizációja is megvalósulhat.

2.5. Építési-, bontási hulladékok

Az építési-bontási hulladék egyik értékes komponense a betontörmelék, amely jelentős inhomogenitást mutathat, ami a felhasználást némileg korlátozhatja. Ennek kiküszöbölésére lehetőség van központi helyeken olyan telepített illetve szemi-mobil, elsősorban mechanikai eljárásokon alapuló előkészítő üzemek telepítése, amelyek kialakításukat tekintve nagyban hasonlítanak a zúzottkő és kavics előkészítési technológiákban alkalmazott megoldásokhoz. Sikeres alkalmazásuk egyik hozománya,

hogy több eltérő „lelőhelyről” összegyűjtött másodnyersanyag feldolgozásával a kapott végtermékek minősége homogenizálható [11].

Saját tapasztalataink alapján elmondható, hogy a felhasználásra tervezett másodnyersanyagok szemcseméret eloszlása és finomszem tartalma, szemcsék alakja és közetfizikai mutatóik jó része módosítható, javítható különböző aprítási, osztályozási eljárások alkalmazásával [12]. A nemzetközi szakirodalmi adatok alapján kiderül, hogy a hulladék betonból készített betonok szilárdsága 20 – 30 % -al kisebb, mint a hasonló szemcseméretű primer nyersanyagból készített betonoké.

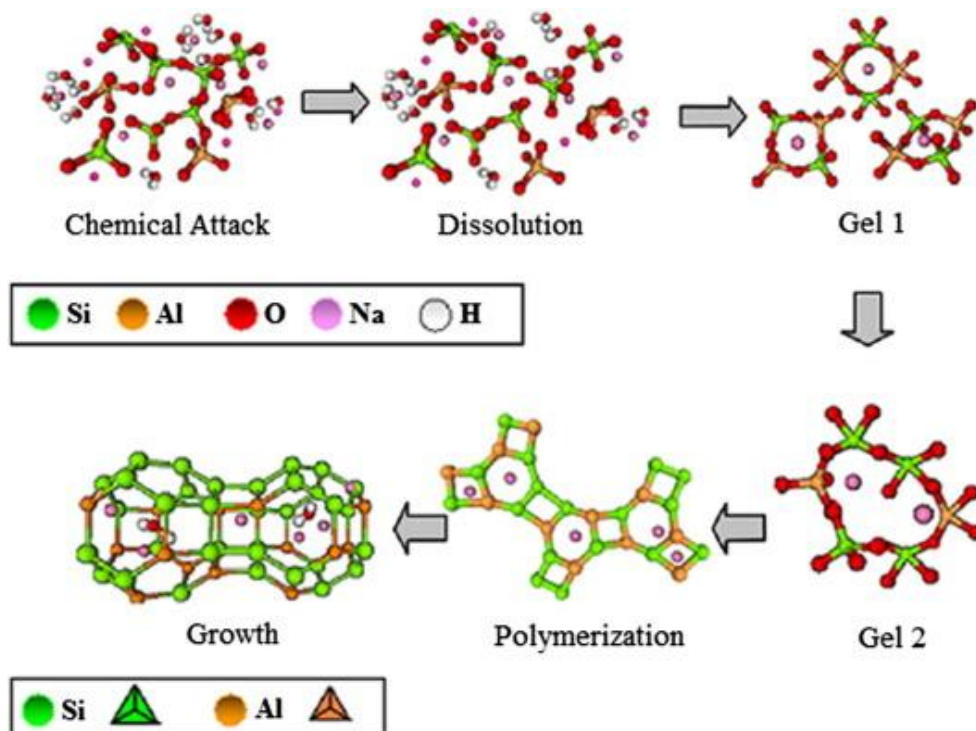
Fontos kiemelni, hogy szelektív aprítással igen jó minőségű és nagy tisztaságú (90-95%) zúzott kavics termék is előállítható bontási beton hulladékból, elsősorban 4/11 mm szemcseméret frakcióban, amely felhasználása várhatóan jobb paraméterekkel rendelkező újbeton gyártására alkalmas [13].

Az építési hulladék anyag újrahasználatosságát a primer anyagokkal való gazdasági versenyképesség mellett a környezettel való összeegyeztethetőség és a műszaki minőség határozza meg. A legfontosabb vizsgálandó műszaki jellemzők az anyagi összetétel, finom szemcsék szemaránya, ásványi és nem ásványi anyagok (pl. vas szerkezeti elemek) összekapcsolódása, összenövése és ezek aránya, szemcseméret eloszlás és a szemcsék alakja, fagyállóság és egyéb közetfizikai paraméterek, szemcsék szilárdsága, szemcse és halmazsűrűség valamint a tört szemek aránya.

3. Hasznosítási lehetőségek

3.1. Geopolimerek

A geopolimerek amorf alumino-szilikátok, melyek lúgos közegben (KOH, NaOH) szilícium-dioxid és alumino-szilikát-oxidok között lejátszódó reakció során állíthatók elő szobahőmérsékleten vagy magasabb hőmérsékleten (30-100°C) egyaránt. Ez a reakció egy amorf félig-kristályos háromdimenziós polimer struktúrát eredményez, mely Si-O-Al kötésekkel áll [15, 16]. Minden olyan elsődleges vagy másodlagos nyersanyag alkalmas geopolimer gyártására, amely reaktív szilícium-dioxid és alumínium-oxid fázisokat tartalmaz, mint pl. a természetes kőzetek vagy ipari melléktermékek: kaolin, erőműi pernye, kohászati salak és vörösiszap [15, 16, 17].



2. ábra

Geopolimerizáció folyamata [14]

A geopolimerek jó fizikai-kémiai és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, többek között alacsony sűrűség, mikro- vagy nanoporozitás, csekély zsugorodás, magas szilárdság, hőstabilitás, nagy felületi keménység, tűz és kémiai ellenálló képesség jellemzi [15, 18]. Az erőművi pernye a geopolimerek potenciális nyersanyaga lehet, a bennük lévő SiO_2 és Al_2O_3 , mint fő alkotórészek jelenlétének köszönhetően [19]. Korlátozó tényező a pernye használatát illetően, annak alacsony reaktivitása, mely hátráltatja (lassítja) a geopolimerizációt. A pernye reakcióképessége függ annak szemcseméret-eloszlásától, fajlagos felületétől, ásványos fázisoktól és az amorf fázisok mértékétől is [18, 19]. A hőmérséklet emelkedésének reakciógyorsító hatása van, továbbá Palomo et al. szerint [16] a hőmérséklet növelése a mechanikai szilárdságban javulást eredményez. Chindraprasirt et al. [17] kimutatták, hogy amikor a hőkezelési hőmérséklet magas, a minta nedvességtartalmának jelentős csökkenése figyelhető meg, ami kedvezőtlenül befolyásolta a szilárdságot. A magas szilárdság elérése érdekében azonban a geopolimerizációs reakció nedvesség jelenlétét igényli.

3.2. Aggregátum, Portland cement

A betongyártás nagy mennyiségű kőzetanyagot igényel, mint aggregátum, amely bizonyos részben kiváltható másodlagos nyersanyaggal, amely mértéke döntően a melléktermékek közetfizikai jellemzőitől függ. Erre a célra bizonyos esetekben felhasználhatjuk a kezeletlen bányászati meddőt vagy salakokat a durvább mérettartományokban >4 mm-es adalékanyagként. Ez az anyag alkalmas flaszterkövekhez, tárolókhoz és parkolókhöz [3]. Emellett az aggregátum a tört és osztályozott betonhulladékkal is kiváltható. A meddőanyagok cementgyártáshoz is alkalmasak agyagtartalmú adalékként, továbbá a széntartalom miatt égés folyamán adalékhőt jelenthet.

A szénbányászati meddők esetében az osztályozatlan vörös /kiégett/ meddőkből építhető például töltés és védőréteg - kapilláris víz hatásának kitett földművön is, ahol a tömör száraz térfogatsűrűség: $1,8-2,0 \text{ t/m}^3$. Megerősített föld-támfal, a szemcsés anyagának jellemzői: maximális szemcseméret 50 mm, a 0,08 mm alatti frakció max. 5 % lehet vagy ipartelepi, mezőgazdasági stb. tárolóterületek burkolása, -kiszolgáló utak, autópálya-leállósávok burkolatalapja is lehet.

3.3. Szinergikus hasznosítás

Az ipari és bányászati hulladékok együttesen is hasznosíthatók a megfelelő előkészítést követően. Ilyen lehetőséget nyújt például a pernye alapú geopolimer kötőanyag és kohászati salak aggregátum alapú öko-beton [20]. További saját eredményeink alapján geopolimer előállítható erőművi pernye és vörösiszap szinergikus hasznosításával is [21, 22]. Legújabb kutatásainkkal igazoltuk, hogy könnyűbeton vagy hőszigetelő panel állítható elő pernye alapú geopolimer és csomagolási polisztirol együttes alkalmazásával, amely anyag lángállósága jelentősen javult a szervesetlen kötőanyaggal történt bevonatolás hatására [23].

4. Összegzés

Az eddig elért saját és nemzetközi eredmények igazolták, hogy a nagytömegű ipari hulladékok, amelyek javarészt a bányászathoz vagy a kapcsolódó iparágakhoz köthetők, sikeresen hasznosíthatók elsősorban az építőanyag iparban, mint kötőanyag vagy aggregátum. Emellett újszerű hasznosítás a fenti hulladékok komplex és szinergikus hasznosítása, ahol az egyes hulladékanyagok előnyös jellemzőit ötvözzük a végtermék tulajdonságainak javítása érdekében.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetem „Felszín alatti erőforrások hatékonyabb kiaknázása és hasznosítása” című projektjének részeként, az Innovációs és Technológia Minisztérium támogatásával zajló Tématerületi Kiválósági Program keretében valósult meg. (Támogatói Okirat ikt. szám: NKFIH-846-8/2019)

Irodalom

- [1] C., Heidrich, J. J., Feuerborn, A., Weir, 2013. Coal combustion products: a global perspective. In: World of Coal Ash Conference. 2013. April 22e 25. In Lexington KY. pp. 25-35.
- [2] CIRCULAR ECONOMY: Closing the loop. European Commission, 2018.
- [3] Mucsi, Gábor ; Csőke, Barnabás ; Balatoni, István ; Juhász, Illés: Szénbányászati meddő hasznosítási lehetőségei. Bányászati és Kohászati Lapok-Bányászat 145 : 2 pp. 17-22. , 6 p. (2012)
- [4] Dinghai Deng, Wenlong Cen: Environmental effect of coal gangue stack area, China Min. Mag. 8. (6) (1999) pp. 87-91.
- [5] Mucsi, Gábor (szerk.) Erőműi pernye komplex hasznosítása. Miskolc, Magyarország: Milagrossa Kft. (2014), p. 218
- [6] A Bizottság Közleménye Az Európai Parlamentnek, A Tanácsnak, Az Európai Gazdasági És Szociális Bizottságnak És A Régiók Bizottságának Úton a körkörös gazdaság felé: „zéró hulladék” program Európa számára /* COM/2014/0398 final/2 */
- [7] Márkus R.: Acélgyártási salakok környezetbarát hasznosítási lehetőségeinek elméleti alapjai, és megvalósíthatósága egyes részeinek kidolgozása. Doktori Disszertáció, Miskolci Egyetem, 2009.
- [8] Ézsias L., Hevesiné Kővári É., Tóth A. (2012): Kohászati salakok: a természetes kőzetek alternatívái az aszfaltgyártás területén. ISD DUNAFERR MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK, 5. évfolyam 2. szám (165) pp. 93-97.
- [9] Lengyel A., Lakatos J. – Vörösiszap hasznosításának lehetőségei, Anyagmérnöki Tudományok, Miskolc, 36/1. kötet., (2011) pp. 35-48.
- [10] Davidovits J. 2011. Geopolymer chemistry and application. Published by: Institut Geopolimère 16 rue Galilée F-02100 Saint-Quentin France, ISBN: 9782951482050, pp. 283, 286.
- [11] Csőke Barnabás, Olessák Dénes: Építési-bontási hulladékok kezelése. Környezetvédelmi Minisztérium, Szakmai füzet sorozata 6, Budapest, 2003.
- [12] Csőke Barnabás: Építési hulladékok előkészítése építési, utépítési célra. Építőanyag 57. évf. 2005. 2. szám
- [13] Csőke, Barnabás: Építési hulladékok előkészítése és hasznosítása. Budapest, Magyarország : OMIKK (1999) , 80 p. ISBN: 9635934149
- [14] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. J Mater Sci 42, 2917–2933 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- [15] Komintás K., Zaharaki D. 2007. Geopolymerisation: A review and prospects for the mineral industry. Mineral Engineering 20 pp. 1261-1277.
- [16] Barbosa V. F. F., MacKenzie K. J. D., Thaumaturgo C. 1999. Synthesis and characterization of sodium polysialate inorganic polymer based on alumina and silica. In Geopolymer '99 Second International Conference, Saint-Quentin, France, 1999. pp. 65-78.
- [17] Mucsi G., Lakatos J., Z. Molnár J., Szabó R. 2014. Development of geopolymer using industrial waste materials. The 9th International Conference “ENVIRONMENTAL ENGINEERING”
- [18] Kumar S., Kumar R. 2011. Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. Ceramics International 37 pp. 533-541.
- [19] Palomo A., Grutzeck M. W., Blanco., M. T. 1999. Alkali activated fly ashes A cement for the future. Cem. Concr. Res. 29 pp. 1323-1329.
- [20] Mucsi G., Rác A., Molnár Z., Szabó R., Gombkötő I., Debreczeni Á. 2014. Synergetic use of lignite fly ash and metallurgical converter slag in geopolymer concrete. Mining Science, 21, pp. 43–55.
- [21] G Mucsi, R Szabo, Á Racz, Z Molnar, F Kristály, S Kumar: Influence of red mud on the properties of geopolymer derived from mechanically activated lignite fly ash. Bauxite Residue Valorisation and Best Practices Conference. Leuven, Belgium, 2015, pp. 211-218.
- [22] G Mucsi, R Szabó, M Ambrus, B Kovács: The development of fly ash–red mud based geopolymer. Analecta Technica Szegedinensia, 2018. 12 (1), pp. 30-38.
- [23] G Mucsi, R Szabó, S Nagy, K Bohács, I Gombkötő, Á Debreczeni: Development of polystyrene-geopolymer composite for thermal insulating material and its properties with special regards to flame resistance. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 251 (1), 012079