

„Salakgranuláló technológia kialakítása az acélgyártási salak építőipari hasznosítása elősegítésére”

Dr. Márkus Róbert

Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Tanszék egyetemi adjunktus

1. Célkitűzés

A projekt célja a régió vaskohászati vállalkozásainál keletkező kezeletlen acélgyártási salakok kezelésére szolgáló technológia kidolgozása, aminek eredményeként a jelenleg hulladéknak minősülő salak terméké minősíthető. Az új termék, a kezelés során kialakított sajátos tulajdonságai révén új piaci szegmens kiépítését teszi lehetővé az egykori hulladék tulajdonosa számára. A különböző vas- és acéltermékek pirometallurgiai (olvasztásos) előállítása során - a folyamatok természetéből adódóan - elkerülhetetlenül keletkeznek különböző melléktermékek, melyek ma Magyarországon kezeletlen hulladéknak minősülnek, s többnyire deponálásra kerülnek. Ennek következtében a hazai salakhányók nemhogy fokozatosan eltűnnek, hanem a termelő vállalat éves kapacitásának függvényében napról napra duzzadnak.

A ma általános hazai gyakorlat szerint a kemencék salakját összegyűjtik, majd - hagyományos értelemben vett - feldolgozóműbe szállítják. Ezek többnyire a gyártóhely közelében található, a szállítás vasúton történik. A feldolgozóműben semmi egyéb nem történik, mint a salak kiöntése a speciális szállítóedényből, majd hűtés utáni mágneses szeparálása (a mágnesezhető vastartalmú anyaghányad kinyerése), szemcsefrakció szerinti osztályozása és tárolóba helyezése. Ezeket az anyagokat természetesen a feldolgozó igyekszik értékesíteni, de a kezeletlen salak néhány, a tárolási idő közben változó közetfizikai tulajdonsága miatt ez meglehetősen korlátozott. Valós értéket jelenleg a vastartalmú, kohászati alapanyag képvisel. A kohászati üzemeknek ez a fajta salakfeldolgozás plusz költséget jelent, a salakfeldolgozó térítés ellenében veszi át a salakot, viszont annak továbbhasznosítása gyakorlatilag nem, vagy kis mennyiségben alacsony áron történik.

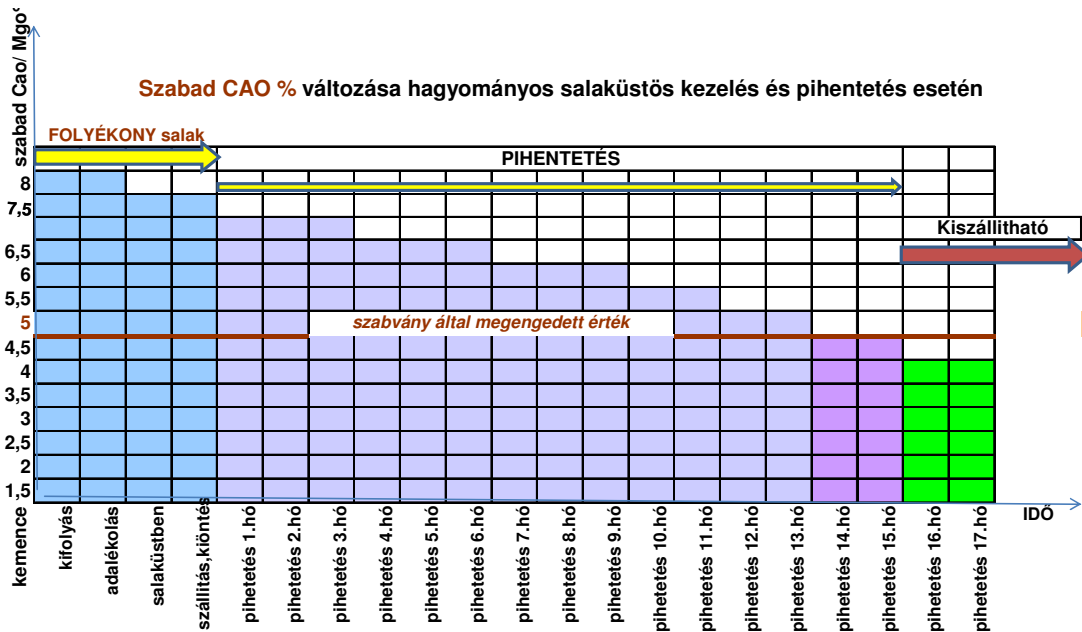
A vaskohászati salakok kezelésére ismertek különféle granuláló eljárások ezek azonban jellemzően a nyersvasgyártás során keletkező nagyolvasztósalakok kezelésére szolgálnak, a gyártó berendezéstől elkülönült technológiai egységben.

A projekt során olyan salakkezelési eljárás kidolgozása történt meg, amely közvetlenül az acélgyártó berendezéshez kapcsolható, az abból kifolyó salak közvetlenül a kezelő egységbe kerül, így komplex technológiai rendszer hozható létre, megteremtve ezzel a minőségbiztosítás kényszerkapcsolati lehetőségét, és a salak terméké minősítését.

2. A salakok kémiai összetétele

A vaskohászati salakok közül kémiailag a nagyolvasztósalakok csoportja a leghomogénebb. Átlagosított betétjének köszönhetően összetétele közel állandó. Ennek köszönhetően kezelésük és hasznosításuk ezeknek a salakoknak a legegyszerűbb, évszázados múltra tekint vissza. Az elektroacélgyártási salak bázikussága igen tág határok között mozog, értékét számtalan paraméter befolyásolja. A technológia által megkövetelt salakképző mennyiségét az alapanyag, a segédanyagok illetve a gyártandó acél minősége, azaz tisztasága határozza meg. Az 1. táblázat második sorában szereplő szabad kalcium-oxid jelenléte a szakirodalomban erősen vitatott. A szabad CaO és szabad MgO egyrészt az olvadékból kicsapódott, másrészt fel nem oldódott részecskék formájában van jelen. A salak stabilitására az előbbi megjelenési forma elhanyagolható mennyisége miatt nincs befolyással. Utóbbi azonban nedvesség hatására hidrátfázissá alakul át miközben térfogata is növekszik. Szabad kalciumnak nevezzük az instabil kalcium-vegyületeket is. Ebben az esetben a salak nem térfogatálló, ugyanis a kalcium-vegyületek képesek különböző átalakulásokra, ami a salak morfológiájának eredménye. Elsősorban a CaO-SiO₂-vegyületek átalakulásai okozzák a megszilárduló salak stabilitási problémáit. Az úgynevezett mészbomlás (dikalcium-szilikát-bomlás) abban az esetben mehet végbe, ha a bázikusság értéke 1,2-nél nagyobb. Ebben az esetben a salak megdermedésekor ásványi dikalcium-szilikát képződik; lehűléskor a β-dikalcium-szilikát átalakul γ-dikalcium-szilikáttá. Ez a folyamat térfogat-növekedéssel jár, ami a salakstruktúra roncsolódásához vezet. Hasonló problémát okoz a vasbomlás jelensége. A vas-alkáli-mangán-szulfid hidratációja okoz térfogat-növekedési problémát azáltal, hogy az említett ásvány vízzel reagálva nagyobb térfogatú vas-hidroxiddá alakul át. Ez a salak 3 tömegszázaléknál magasabb FeO-tartalma esetén következhet be. Több lehetőség is van az említett káros folyamatok kivédésére. Ilyen lehet a salak gyors lehűtése és „üveggé dermedtése”, vagy akár a salak SiO₂-ban való dúsítása, illetve egyéb, a CaO/SiO₂ arányt csökkentő beavatkozás (pl. üvegtörmelékes kezelés). Ezek az utóbb említett technológiai megoldások

tartoznak a mesterséges öregítés körébe. Megvizsgáltuk, milyen pihentetési idő után lehet a salakot stabilnak tekinteni. Az 1. ábráról leolvasható, hogy a biztonságos öregítés időszükséglete minimum 15 hónap, eddig haladja meg a szabad kalcium- és magnéziumoxid koncentrációja a biztonságos értéket.



1. ábra A salak természetes öregítésének vizsgálata

1. táblázat A vaskohászati salakok jellemző kémiai összetétele (%)

	Kohósalak	Konverter salak	Elektrosalak	Üstmetallurgiai salak
CaO	36 - 43	48 - 54	25 - 35	30-52
CaO _{szabad}	-	1 - 10	0 - 4	1 - 10
SiO ₂	35 - 39	11 - 18	8 - 18	8 - 23
Al ₂ O ₃	8 - 12	1 - 4	3 - 10	3 - 20
MgO	4 - 12	1 - 4	3 - 9	6 - 12
Feösszes	< 0,5	14 - 19	20 - 30	0,5 - 12
Mnösszes	< 0,5	1 - 4	2 - 5	0,5 - 3
Na ₂ O	< 0,5	-	-	-
K ₂ O	< 0,5	-	-	-
S	1,2 - 1,6	-	-	-

3. A salakok ásványtani módosulatai

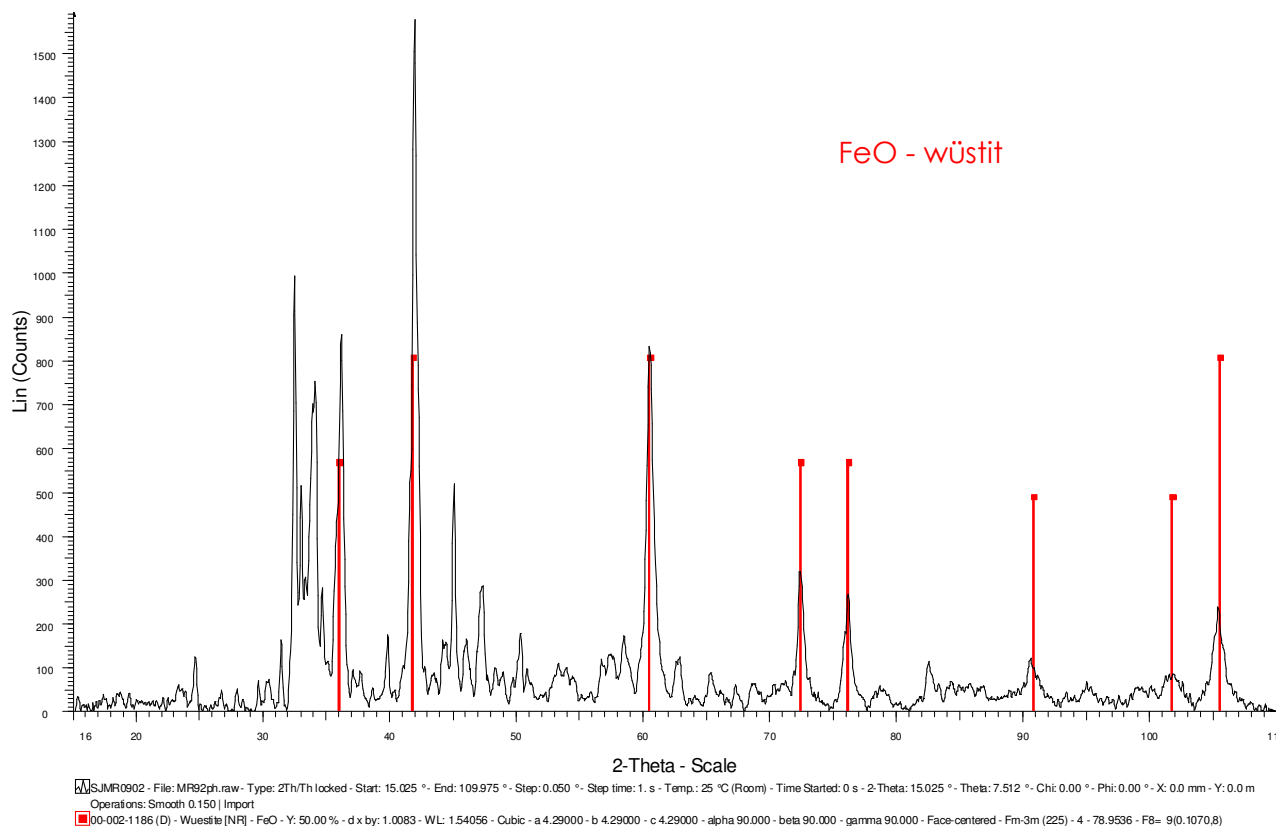
Az elektroacélgyártás nagy bázikusság-értéke alapján nagy mennyiségű CaO alkotja a salak fő tömegét. A salakban nem önálló fázisként, hanem a legkülönbözőbb vegyületek formájában van jelen. Ezek közül a legjellemzőbb a:

2. táblázat A vaskohászati salakokra jellemző ásványtani vegyületek

Kohósalak		
- Melilith		
Keverékkristály az alábbi fázisokból	$2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$	(Gehlenit)
	$2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$	(Ackermanit)
	$3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$	
<i>Nincs szabad oxid</i>		
Acélművi salak		
- Dikálciumszilikát	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	
- Trikálciumszilikát	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	
- Dikalciumferrit	$2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	
- Wüstit	(Ca, Fe, Mg, Mn)O	
- Kalciumoxid	$\text{CaO}_{\text{szabad}}$	
- Periklas	$\text{MgO}_{\text{szabad}}$	

Az acélműi gyártóberendezésből kifolyó salak, összetétele alapján az $\text{FeO}\text{-CaO}\text{-Fe}_n\text{-SiO}_2\text{-MgO}\text{-MnO}_n$ rendszerbe sorolható. Az acélgyártáskor képződött salak összetételét ebbe a rendszerbe behelyettesítve a magneziowüstit kiválási tartomány a jellemző. A lehüléskor kivált ásványi fázisoknak a salakok tulajdonságai szempontjából ugyanolyan nagy jelentőségük van, mint a kémiai összetételnek. A legfontosabb ásvány fázis mindenképp a dikalciumferrit ($2\text{CaO}\cdot\text{FeO}$), a már említett magneziowüstit (Mg, Ca, Mn, Fe)O, a dikalciumszilikát ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), valamint az elenyésző mennyiségben előforduló szabad CaO és szabad MgO. E két utóbbi komponens visszaszorítását a bázikusság csökkentésével segítik. A felhasználási tulajdonságok javítás szempontjából a gyártó cégek a szabad CaO és periklász (szabad MgO) tartalom visszaszorítására törekednek, megakadályozva ezzel a felhasználáskor esetlegesen bekövetkező hidratizálódást. Erre a visszaszorításra jól alkalmazható módszer a folyékony állapotú salak vízpermettel való hőkezelése, granulációs darabosítása, melynél a salak külső rétegének megszilárdulás

közbeni szétporladása után a felület alatti réteg is megfelelően kezelhető. Az anyagokat felépítő különböző vegyületek röntgendiffrakció segítségével mutathatók ki. A salak szerkezetének feltárásához elvégeztük ezt a vizsgálatot. A mérés kiértékelése viszont meglehetősen nehézkes, ugyanis a sokféle vegyület egymás melletti megjelenése elfedheti egymás hullámait. A 2. ábra az alapgörbén mutatja a wüstit jellemző vonalait.

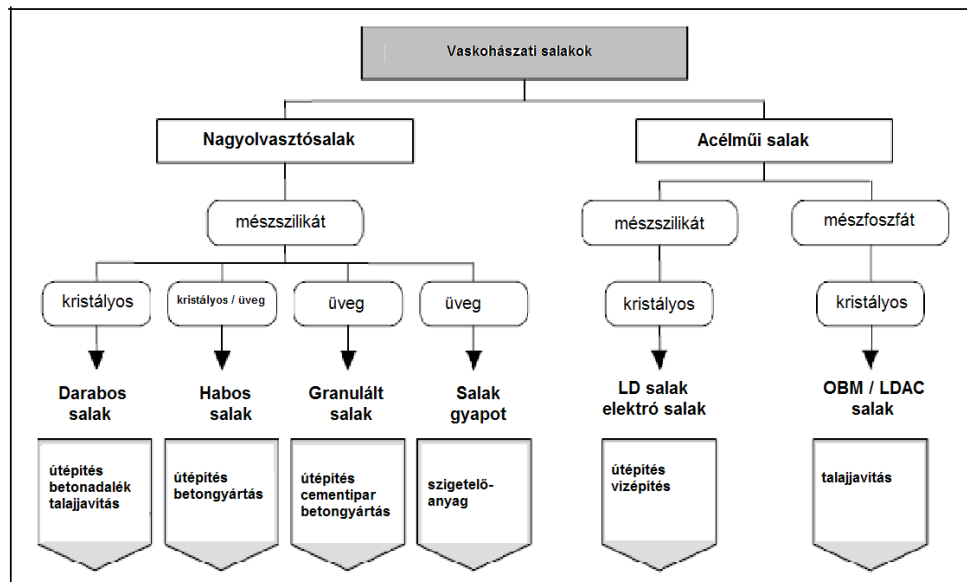


2. ábra A salak röntgendiffrakciós görbéje a wüstit jellemző csúsaival

4. A salakkezelési eljárások összefoglalása és összehasonlítása, a megfelelő salakfeldolgozási elv kiválasztása

A vas- és acélgyártási technológiák során, a gyártott főtermék mellett, az eljárásokkal szorosan összefüggő ásványi melléktermékek keletkeznek, amelyek a betétanyagok nemfémes alkotóit tartalmazzák. Az utóbbi években a képződő salak mennyisége jelentősen csökkent, a nagyolvasztósalakoknál 700 kg/t fajlagos értékről 220-300 kg/t-ra. A fajlagos salakmennyiség további csökkentése eljárás-technikai és technológiai alapon szinte már lehetetlen. A nagyolvasztósalakok és az acélgyártási salakok az évente keletkező salakmennyiség 90 %-át képviselik. Integrált acélművekben a keletkező salakmennyiség (nagyolvasztói+acélműi) 375 kg/t nyersacél fajlagos mennyiségű. A vaskohászati salakokat már a klasszikus eljárásoknál is

hasznosították, pl. a Thomas-eljárás salakjai talajjavító anyagként hasznosultak, míg a nagyolvasztósalakok az útépités és a cementipar hasznos alapanyagai. Ma a keletkezett salakok 90 %-át feldolgozzák, rendszeres minőség-ellenőrzés mellett. A korszerű kohászati technológia úgy van kialakítva, hogy nem csak a főtermék nyersvas és acél, hanem a salak minőségét is optimalizálják. A vaskohaszatban keletkező salakok elvi kezelési lehetőségeit a 3. ábra tartalmazza.



3. ábra. A vaskohaszatban keletkező salakok elvi kezelési lehetőségei

4.1. Nagyolvasztósalakok

Mennyiség szerint a legjelentősebb melléktermék, amely a nagyolvasztós nyersvasgyártásnál keletkezik, a nagyolvasztósalak. Tonnánként mintegy 220-300 kg keletkezik, de az 1950-es években ez a mennyiség még elérhette a 700 kg-ot is. A fajlagos salakmennyiség további csökkentése eljárás-technikai és technológiai alapon szinte már lehetetlen. A hűtési feltételektől függően a nagyolvasztósalak megszilárdulása a következő formákban történhet:

- Darabos nagyolvasztósalak,
- Porózus habsalak (Hüttenbims),
- Finomszemcsés homoksalak (granulált salak, Hüttensand).

A salak kémiai összetétele a nyersvasgyártási technológia függvénye. A kémiai összetétel mellett a salak összetevői kioldódási képességének (eluát) van jelentősége, a környezeti terhelés (nehézfémek!) szempontjából. A 3. táblázat a nagyolvasztósalakok feldolgozási lehetőségeit foglalja össze.

3. táblázat A nagyolvasztósalakok feldolgozási lehetőségei

Művelet	Struktúra	Termék
lassú hűtés levegőn	kristályos szerkezet	darabos nagyolvasztósalak
nagyon gyors hűtés vízzel granuláló berendezésben	üveges amorf	granulált salak (Hüttensand)
közepes intenzitású hűtés, szabályozott gázmennyiséggel	nagy porozitás, részben üveges, részben kristályos szerkezet	habsalak (Hüttenbims)
porlasztás levegővel vagy vízgőzzel	finomszemcsés, üveges	salakgyapot
folyékony salak forgódobon hűtve	finom frakció: majdem teljesen üveges durva frakció: részben üveges, részben kristályos	salakpellet

4.2. Acélgyártási salakok

Az acélgyártó eljárások során egy tonna acélra vonatkoztatva 120-150 kg salak keletkezik. A salakok kémiai összetétele erősen függ az eljárástól és az eljárás során felhasznált anyagoktól (4. táblázat). A különbözőség a mész, szilikát, foszfát és vastartalomban jelenik meg.

4. táblázat Salakok kémiai összetétele

Alkotó, %	LD	LD/AC
CaO	36-50	60
SiO ₂	10-15	9
Al ₂ O ₃	1-3.5	<2
MgO	4-8	<3
Fe _{összes}	18-24	12
Fe _{fém}	<1	<1
MnO	5	<4
P ₂ O ₅	0,7-2	15
Cr ₂ O ₃	<1	<1
CaO _{szabad}	<10	<7
S _{összes}	0,1-0,2	n.a.
CaO/SiO ₂	0,9-1,3	1

Az acélgyártási salakok hasznosíthatósága elsősorban a veszélyes környezeti terhelést okozó összetevők kioldási képességének a függvénye. Mind a hasznosításnál, mind a tárolásnál figyelemmel kell lenni a rendeletekben előírt veszélyességi határérték koncentrációkra.

4.2.1. A konverteres eljárás salakja

A konvertersalakok kemény, szürke, a természetes kőzetekhez hasonló formában dermednek meg, szerkezetük kevésbé porózusabb, mint a nagyolvasztósalakoké. Fizikai előkészítéssel (örlés, rostálás, mágneses szeparálás) a vastartalom az alaptéchnológiában újrahasznosítható. A nemfémes

ásványi alkotórész az építőiparban beton adalékanyagként, vagy a mezőgazdaságban talajkondicionálásra használható. A kristályosan megdermedt konvertersalakok legnagyobb hányada az építőiparban, azon belül elsősorban az útépítésben hasznosítható. Mivel nagy az aprózódással szembeni ellenálló képessége, kiválóan alkalmas útalapok anyagaként. A felhasználás azonban korlátozott, mert a szabad CaO és MgO tartalom miatt a térfogatálló képesség korlátozott. Ennek kiküszöbölése érdekében a konvertersalakokat szabályozott módon pihentetni kell, a hasznosítás előtt, pedig klasszifikálni kell. Például 7 % fölötti szabad CaO-t tartalmazó salakokat nem szabad fölhasználni.

4.2.2. Az elektroacélgyártás salakjai

Az elektroacélgyártás során keletkező fajlagos salakmennyiség 80-150 kg/t, az alkalmazott technológia függvényében. Például nemesacélgyártás esetén a salakmennyiség 170 kg/t, míg ötvözetlen szerkezeti acél gyártása esetén 130 kg/t. Továbbá meghatározza a fajlagos salakmennyiséget a felhasznált betétanyagok, ötvöző és salakképző anyagok minősége. Az elektrósalakokban mindenekelőtt a Ca, Mg, Si, Mn, Al, Fe vegyületei, elsősorban oxidjai találhatóak (5. táblázat).

5. táblázat Salakok kémiai összetétele

Alkotó, %	EAF	AOD
CaO	35-45	35-50
SiO ₂	10-18	25-35
Al ₂ O ₃	3-8	1-10
MgO	7-15	4-7
Fe _{összes}	10-30	<2
Fe _{fém}	<1	<1
MnO	<1	n.a.
P ₂ O ₅	<1	<4
Cr ₂ O ₃	<2	1-5
CaO _{szabad}	<5	<5
S _{összes}	0,2-1	<0,4

5. A kidolgozott technológia alapparamétereinek meghatározása

A nedves granuláláshoz szükséges hűtővíz mennyiségét számításokkal határoztuk meg.

Alapegyenlet:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \text{ [J]}$$

Fajhőértékek:

$$c_{\text{víz}} = 4,220 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T_{\text{víz}} = 60^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 35^\circ\text{C}$$

$$c_{\text{salak}} = 1,676 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T_{\text{salak}} = 1700^\circ\text{C} - 400^\circ\text{C} = 1300^\circ\text{C}$$

$$c_{\text{homok}} = 0,712 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T_{\text{homok}} = 1700^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 1675^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{salak}} = 1500 \text{kg/perc}$$

$$m_{\text{homok}} = 150 \text{kg}/12 \text{t salak} = 18,75 \text{kg}/1,5 \text{t salak}$$

A salaktól elvonandó hő mennyisége

$$Q_{\text{salak}} = c_{\text{salak}} \cdot m_{\text{salak}} \cdot \Delta T_{\text{salak}} = 1,676 \cdot 1500 \cdot 400 = 1\,005\,600 \text{ kJ/perc} \cong 1005,6 \text{ MJ/perc} \\ (8044,8 \text{ MJ}/12 \text{t})$$

Vizes hűtés esetén szükséges víz mennyisége

$$Q_{\text{víz}} = Q_{\text{salak}}$$

$$c_{\text{víz}} \cdot m_{\text{víz}} \cdot \Delta T_{\text{víz}} = c_{\text{salak}} \cdot m_{\text{salak}} \cdot \Delta T_{\text{salak}}$$

$$m_{\text{víz}} = \frac{c_{\text{salak}} \cdot m_{\text{salak}} \cdot \Delta T_{\text{salak}}}{c_{\text{víz}} \cdot \Delta T_{\text{víz}}} = \frac{1,676 \cdot 1500 \cdot 400}{4,220 \cdot 35} = 6808,4 \text{kg} \cong 7 \text{m}^3 / \text{perc} \quad (56 \text{m}^3/12 \text{t})$$

A levegő hűtőhatása (konvekció)

$$Q_{\text{konvektív}} = \alpha_k \cdot (T_{\text{salak}} - T_{\text{levegő}}) \cdot A \cdot t = 5,95 \cdot (1700 - 25) \cdot 8 \cdot 60 = 4783800 \cong 4,8 \text{ MJ/perc} \\ (38,4 \text{ MJ}/12 \text{t})$$

A szükséges hűtővíz mennyisége 1 perc alatt konvekció mellett

$$Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{víz}} = Q_{\text{salak}}$$

$$m_{\text{víz}} = \frac{Q_{\text{salak}} - Q_{\text{konvektív}}}{c_v \cdot \Delta T_v} = \frac{1005,6 - 4,8}{4,220 \cdot (60 - 25)} = 6,8 \text{m}^3 / \text{perc} \\ (54,4 \text{m}^3/12 \text{t})$$

A szekunder hűtővíz mennyiségének meghatározása

- a salak fizikai hője a rezgő adagolon:

$$Q_s = c_s \cdot m_s \cdot \Delta T$$

$$\Delta T_1 = 1200^\circ\text{C} \quad (1300^\circ\text{C} \rightarrow 100^\circ\text{C})$$

$$\Delta T_2 = 1100^\circ\text{C} \quad (1300^\circ\text{C} \rightarrow 200^\circ\text{C})$$

$$\Delta T_3 = 1000^\circ\text{C} \quad (1300^\circ\text{C} \rightarrow 300^\circ\text{C})$$

$$\Delta T_4 = 900^\circ\text{C} \quad (1300^\circ\text{C} \rightarrow 400^\circ\text{C})$$

$$Q_1 = 1,676 \cdot 1500 \cdot 1200 = 3,02 \text{ MJ/perc}$$

$$(24,16 \text{ MJ}/12t)$$

$$Q_2 = 1,676 \cdot 1500 \cdot 1100 = 2,8 \text{ MJ/perc}$$

$$(22,4 \text{ MJ}/12t)$$

$$Q_3 = 1,676 \cdot 1500 \cdot 1000 = 2,5 \text{ MJ/perc}$$

$$(20 \text{ MJ}/12t)$$

$$Q_4 = 1,676 \cdot 1500 \cdot 900 = 2,3 \text{ MJ/perc}$$

$$(18,4 \text{ MJ}/12t)$$

- a hűtéshez szükséges víz mennyisége:

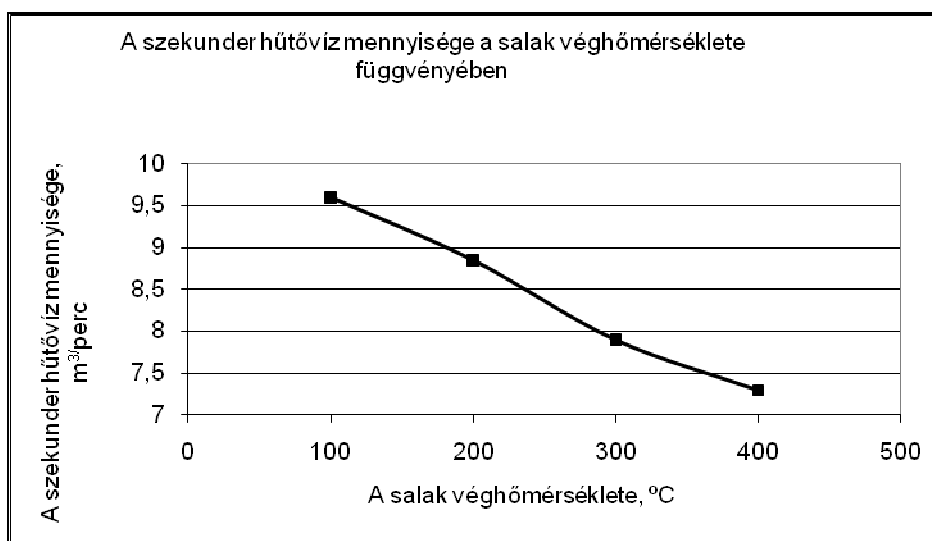
$$\Delta T_{\text{víz}} = 75^\circ\text{C} \quad (25^\circ\text{C} \rightarrow 100^\circ\text{C})$$

$$m_1 = \frac{Q_1}{c_v \cdot \Delta T_v} = \frac{3,02 \cdot 10^6}{4,220 \cdot 75} = 9,6 \text{ m}^3/\text{perc}$$
$$(76,8 \text{ m}^3/12t)$$

$$m_2 = 8,85 \text{ m}^3/\text{perc}$$
$$(70,8 \text{ m}^3/12t)$$

$$m_3 = 7,9 \text{ m}^3/\text{perc}$$
$$(63,2 \text{ m}^3/12t)$$

$$m_4 = 7,3 \text{ m}^3/\text{perc}$$
$$(58,4 \text{ m}^3/12t)$$



4. ábra

A szekunder hűtés közben keletkező gőz mennyisége

$$1 \text{ mól gáz} \rightarrow 2,241 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mól víz} = 18\text{g}$$

$$x \text{ mól víz} = 1000\text{g}$$

$$x = \frac{1000}{1,8} \cdot 1 = 55,56\text{mól}$$

$$1\text{kg víz} = 55,56 \cdot 2,241 = 124,5\text{m}^3$$

$$V_0 = 1000 \text{ kg} = 1\text{m}^3 = 124500 \text{ m}^3$$

$$T_{\text{salak}} = 100^\circ\text{C}$$

$$V_{\text{göz}} = m_{\text{víz}} \cdot V_0 = 9,6 \cdot 124500 = 1195200\text{m}^3/\text{perc} \quad (9561600 \text{ m}^3/12\text{t})$$

$$T_{\text{salak}} = 200^\circ\text{C}$$

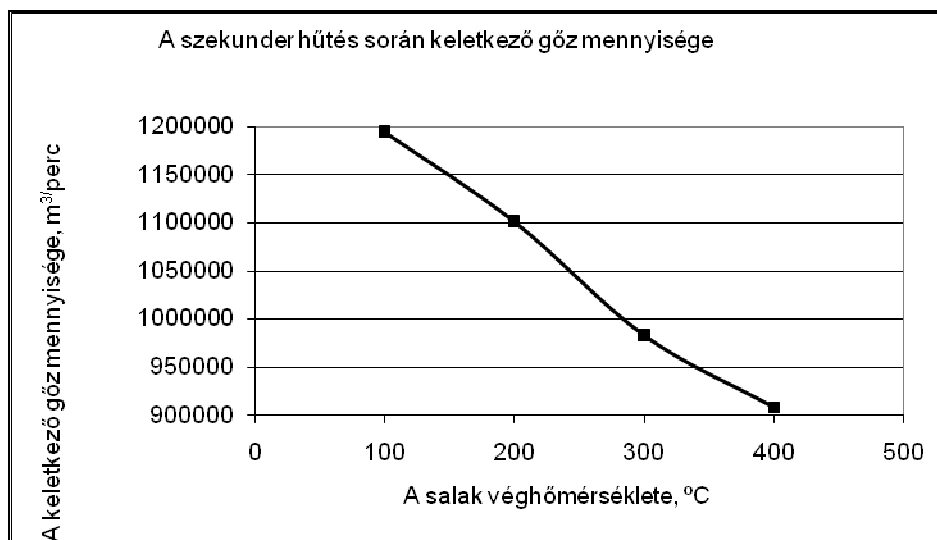
$$V_{\text{göz}} = 8,85 \cdot 124500 = 1101825\text{m}^3 \quad (8814600 \text{ m}^3/12\text{t})$$

$$T_{\text{salak}} = 300^\circ\text{C}$$

$$V_{\text{göz}} = 7,9 \cdot 124500 = 983550\text{m}^3 \quad (7868400 \text{ m}^3/12\text{t})$$

$$T_{\text{salak}} = 400^\circ\text{C}$$

$$V_{\text{göz}} = 7,3 \cdot 124500 = 908850\text{m}^3 \quad (7270800 \text{ m}^3/12\text{t})$$



5. ábra

6. A kezelési technológia laborszintű modellezése

Az acélgyártási salakok viselkedésének megismeréséhez és a granuláló eljárás megfelelő kialakításához laboratóriumi nagyhőmérsékletű vizsgálatokat végeztünk a folyamatok modellezésére. Első lépésként a jellemző összetételű salak dermedéspontját kellett meghatározni. Azért kell a jellemző összetételt kiválasztani, mert az egyes salakalkotó komponensek olvadáspontja más és más, összességében vizsgálva a rendszer olvadás/dermedéspontját csak empirikus vizsgálatok segítségével lehet meghatározni. A mérések alapján a salak megszilárdulásának hőmérséklete $T_{olv} = 1300^{\circ}\text{C}$, azaz a salak szállíthatóságához legalább erre a hőmérsékletre kell azt hűtenünk.

6.1. A kapott salakok laboratóriumi vizsgálata

A megszilárdulási vizsgálatnál felhasznált salak kémiai összetétele a következő táblázatban (6.) látható.

6. táblázat A granulált salak összetétele

Vegyületek	%
SiO ₂	20,7
FeO	18,32
MnO	4,48
MgO	3,63
CaO	28,85
Al ₂ O ₃	6,21
C	0,4
S	0,11
Elemek	mg/kg
Zn	349,9
Pb	53,89
Co	*
Cd	*
Ni	2414
Cr	84,7
Cu	434,1
As	384,8
Sn	840,2
Mo	167,1
Ba	3390
Hg	*
Se	*

Megjegyzés: * jel esetén a koncentráció <1 mg/kg

A táblázatból jól látható, hogy a salakban található nehézfémek és egyéb szennyezőanyagok a granulálás hatására gyakorlatilag oldhatatlan állapotba kerültek, ami azt bizonyítja, hogy a vitrifikáció folyamata ténylegesen lezajlott. Kérdéses, hogy a hűtéshez felhasznált víz képes-e kioldani bármit is a salakból. Erre ad választ a 7. táblázat, mely a hűtésből visszatérő víz elemzési értékeit tartalmazza.

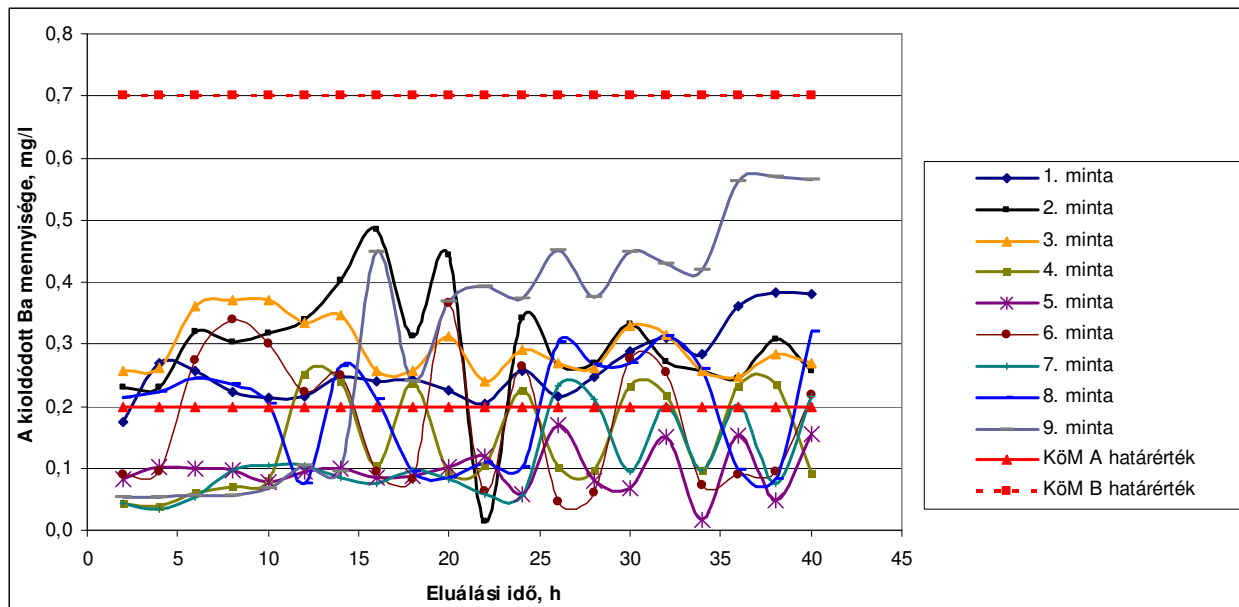
7. táblázat A granuláló víz által kioldott alkotók mennyisége

Alkotó	1	2	2/1	2/2	határérték
Zn [mg/l]	0,068	0,072	0,067	0,000	0,200
Pb [mg/l]	0,012	0,000	0,011	0,000	0,010
Cd [mg/l]	0,016	0,006	0,017	0,009	0,005
Ni [mg/l]	0,014	0,016	0,012	0,011	0,020
Cr [mg/l]	0,139	0,092	0,036	0,071	0,050
Cu [mg/l]	0,104	0,048	0,045	0,040	0,200

A táblázatban az 1. szám az első kísérlet első vízmintáját, a 2. szám az első kísérlet második vízmintáját, míg a 2/1 és 2/2 a második salakgranulálási kísérlet első, illetve második vízmintáját jelöli. Ebben a táblázatban már vannak magasabb értékek, ezek azonban nem teljesen tükrözik a valóságot, ugyanis laboratóriumi körülmények közt csak kis mennyiségű salakot tudunk egyszerre megolvasztani és granulálni, s ez összetételi eltérésekhez vezethet.

6.2. A kezelt salak és a hagyományos úton keletkező salak összehasonlítása

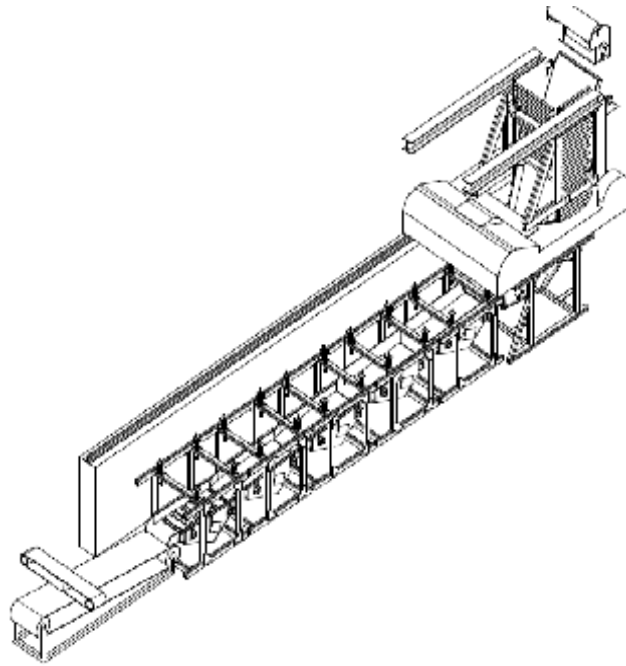
A 6. ábra a hagyományosan leengedett, kezeletlen salak környezetvédelmi kockázatát mutatja be a bárium csapadék hatására történő kioldódása esetén.



6. ábra Az eluátumvizsgálatból származó értékek és a KöM -határértékek összehasonlítása

7. Az új salakkezelési technológia kidolgozása

Az ívkemence küszöbén kifolyó acélgyártási salak erős primer permetvízsugaras hűtés közben kerül a nagy fordulattal forgó granuláló dobra. A mechanikai hatás és az intenzív vízsugaras hűtés hatására a salak különböző szilárdsági állapotú szemcse formákban kerül az első vibrációs anyagszállító vályúba. További erős hűtés következtében folytatódik a salakszemcsék megszilárdulása és vibrációs mozgatása. Az állandó vízpermetes hűtés hatására a teljes mértékű megszilárdulás után a salak szemcsék további folyamatos hűtése történik a második és a harmadik vibrációs vályúban vagy asztalon. A víz-salak vegyes fázis mozgatását a vizes áramlás mellett az asztalok vibrációs rezgő mozgása is elősegíti. A harmadik vibrációs vályú után a vizes-salak fázis egy gumiszalagra adódik át. Az átadott salak hőmérséklete kb. 150°C (a salak véghőmérsékletét a fogadó gumiszalag hőállósága szabja meg, ez kb. 170°C). A szalag első részében megtörténik a hűtővíz elválasztása a salakszemcséktől. A lefolyó meleg víz egy gyűjtő tálcán és levezető csatornán keresztül kerül ki az üzemcsarnokból a külső ülepitő-tároló medencébe. A hűtővizet ülepités, hűtés után visszajaratják a salakszilárdítási folyamatba. A szállítószalagos szállítás alatt történik a vasszemcsék kiválasztása mágneses szeparátor segítségével. A salakot közvetlenül a szállító járműbe vagy az ideiglenes kijelölt tároló helyre jaratják. A szállított salak hőmérséklete - 17 m-es vibrációs permetvízes hűtés mellett – csökken, a vályúk végénél kb. 150°C (a salak véghőmérsékletét a fogadó gumiszalag hőállósága szabja meg: ez kb.170°C). A hűtési, szilárdítási folyamatban keletkező nagy mennyiségű meleg vízgőzt folyamatosan szívják el a csarnokban illetve a csarnokon kívül elhelyezett ventilátorokkal.



7. ábra Az általánosan alkalmazható salakgranuláló technológia összeállítási terve

A folyamat fő részei, egységei;

1. Salakos kocsik a rászertelt primer hűtéssel és a granuláló berendezéssel
2. A 3db vibrációs vályú /szélesség: 1700mm, hossz: 6000mm/db, működési hossz: kb. 17000mm/3db
3. Vályúkra szerelt szekunder hűtés
3. Ellátó hűtővíz rendszer, a vízgyűjtő, ülepitő medencékkel
4. Gőz elszívó rendszer
5. Gumi szállítószalagok /2-3db/ elrendezés a kiszállítás módjától függ.
6. Mágneses szeparátor
7. Villamos megtápláló és felügyeleti rendszer
8. Salaktároló és kiszállító járművek

8. A kísérletek lefolyása

A salakkezelési kísérletek során mintát vettünk a kezelt salakból és az elfolyó hűtővízből. Mértük a kezelőrendszerből kijövő kezelt salak és a hűtővíz hőmérsékletét. A mintavétel rendszerét a kísérletek folyamán folyamatosan alakítottuk ki, ezért a levett minták nem mindegyike alkalmas releváns megállapítások kialakítására. Az értékelésre alkalmas vizsgálatok eredményeit az alábbiakban mutatjuk be.

8.1. Kísérleti minták vizsgálatának eredményei

8 táblázat Kezelt salakok kémiai összetétele, a. május 8., b. július 31.

8.a.

2009.05.08		
Iktatószáma:	157	158
Megnevezése:	Kísérleti salak	Kísérleti salak
Azonosítója:	X csapolás	Y csapolás
CaO [%]	32,54	31,4
SiO ₂ [%]	19,2	20,1
Bázikusság	1,69	1,56
Vezetőképeség [μS]	2,35	2,29
Szabad CaO [%]	0	0

8.b.

2009.07.31				
Iktatószáma:	475	476	477	478
Megnevezése:	Kísérleti salak	Kísérleti salak	Kísérleti salak	Kísérleti salak
Azonosítója:	1. csapolás	2. csapolás	3. csapolás	4. csapolás
alkotók:				
Szabad Ca O [%]				
Bázikusság	1,8	1,26	1,47	1,35
SiO ₂ [%]	14,2	19,5	18,2	17,8
CaO [%]	25,6	24,7	26,8	24,1
MgO [%]	9,06	2,93	3,15	5,12
FeO [%]	38,2	35,2	36,8	36,7
MnO [%]	4,57	3,98	4,26	4,2

8.2. A kezelt salakok szabad CaO tartalma:

9. táblázat, július 31-i salakok szabad CaO tartalma

2009.07.31						
Iktatószáma:		475	476	477	478	
Megnevezése:		Kísérleti salak				tiszta CaO vegyszer
Azonosítója:		1. csapolás	2. csapolás	3. csapolás	4. csapolás	
alkotók:						
bemérés [g]		0,5	0,5	0,5	0,5	0,05
fogyás [mL]		2,2	1,2	1,6	3,7	8,5
CaO egyenérték 0,02mol/l KIII-ban		0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
hígítás		50/500	50/500	50/500	50/500	50/500
Szabad CaO [%]		2,46	1,34	1,79	4,14	95,2
CaO [%]		25,6	24,7	26,8	24,1	
SiO ₂ [%]		14,2	19,5	18,2	17,8	
Bázikusság		1,8	1,26	1,47	1,35	

8.3. Az öblítővizek kémiai összetétele

10 táblázat Öblítővíz paraméterei, a. május 8., b. július 31.

10.a.

2009.05.08							
Iktatószáma:	228	229	230	231	232	233	234
Megnevezése:	Öblítő víz						
Azonosítója: alkotók:	VAK	1. csapolás	8 ⁵⁰ óra	2. csapolás	9 ⁵⁰ óra	3. csapolás	10 ⁵⁰ óra
pH	6,9	7	6,9	6,8	6,7	6,7	6,6
Vezetőképesség [μS]	336	322	305	338	355	297	324
Össz. keménység [mg/l]	2	1,7	1,7	1,5	1,8	1,5	1,6
Ca keménység [mg/l]	1,1	0,8	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2
Cl- [mg/l]	76	40	32	32	40	28	32
p szám [mekv/l]	0,4	0	0	0	0	0	0
m szám [mekv/l]	4	2	2	2	4,8	2	0,8

10.b.

2009.07.31				
Iktatószáma:	470	471	472	473
Megnevezése:	Öblítővíz			
Azonosítója: alkotók:	1. csapolás	2. csapolás	3. csapolás	4. csapolás
pH	6,3	7,7	6,4	7,8
Vezetőképesség [μS]	1730	991	1575	924
Össz. keménység [mg/l]	1,44	3,44	1,37	4,27
Ca keménység [mg/l]	1,37	3,42	1,32	4,27
Cl- [mg/l]	32	320	520	300
p szám [mekv/l]	0	2	0	2
m szám [mekv/l]	2	3	2	4

8.4. A keletkezett salakok szemcsefrakció összetétele:

A kezelt salakok szemcseösszetételét a július 10-i és a július 31-i kísérletekből határoztuk meg, két alkalommal. A két vizsgálat között mindkét sorozatnál mintegy 1 hónap telt el. Ez az időszakos vizsgálat a tartózkodási idő alatti aprózódás megfigyelésére irányult. A július 10-i kísérletek eredményeit a 8. és a

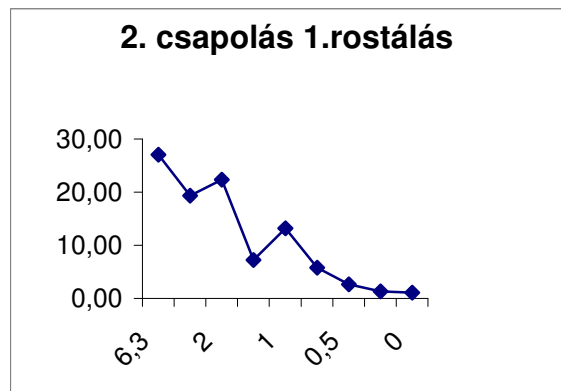
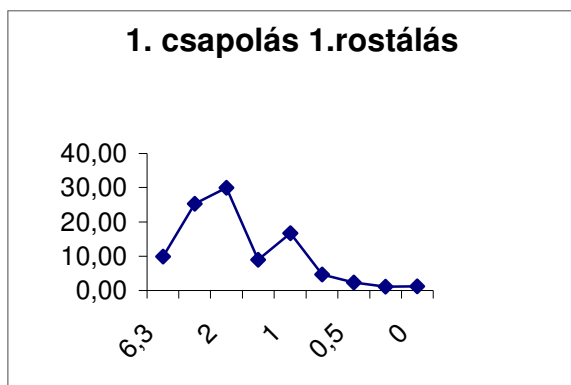
9. ábrán mutatjuk be. A két ábrapár a két acélműi adagból keletkezett salak július 10-i, és augusztus 27-i rostálások eredményeit foglalja össze.

A július 31-i kísérletek négy adagjának salakjából készült frakcióvizsgálatok számszerű eredményeit a 11. táblázatban foglaltuk össze, míg a szemeloszlási görbék a 10. és 11. ábrán láthatók.

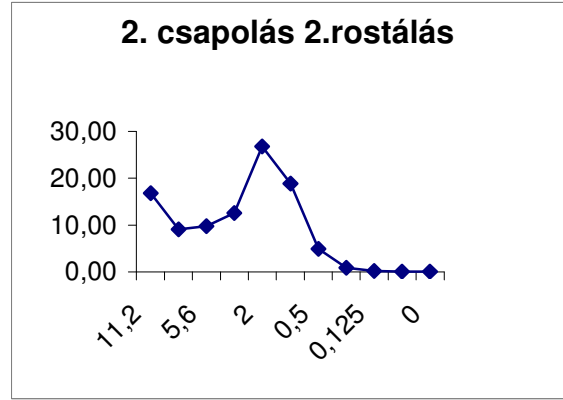
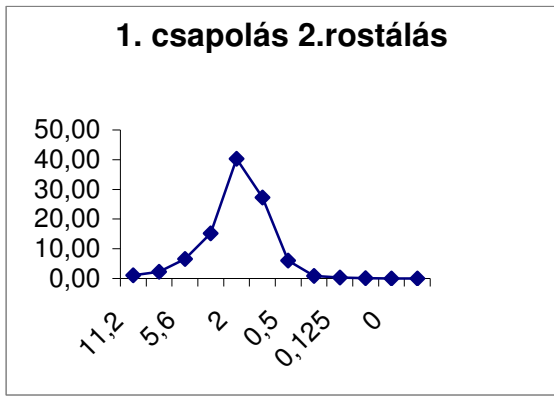
11. táblázat Kísérleti salakok szemcsefrakciói

2009.07.31				
1. rostálás, 08. 10.				
lyukméret	1.	2.	3.	4.
mm	csapolás			
11,2	2,85	9,76	16,69	16,10
8	1,23	10,60	11,85	11,86
5,6	1,77	21,91	18,55	13,70
4	4,25	20,59	16,26	13,39
2	27,73	25,43	23,87	22,51
1	35,99	9,83	10,60	14,99
0,5	15,95	1,52	1,59	5,47
0,25	6,87	0,25	0,37	1,64
0,125	2,51	0,08	0,12	0,29
0,063	0,68	0,03	0,05	0,05
0	0,18	0,02	0,03	0,01

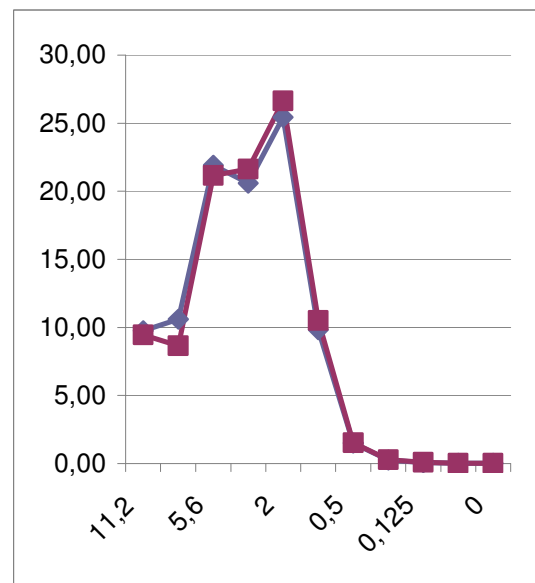
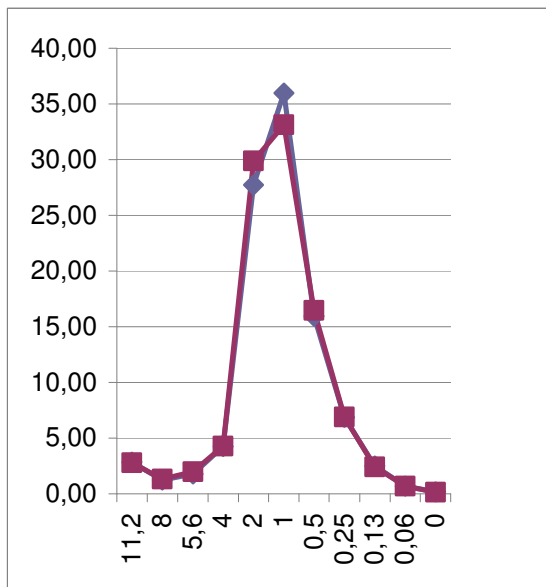
2. rostálás, 09. 08.				
11,2	2,80	9,44	16,49	14,15
8	1,33	8,66	11,80	12,71
5,6	1,97	21,15	16,13	14,23
4	4,27	21,63	16,90	13,67
2	29,88	26,65	25,44	22,79
1	33,14	10,52	10,68	14,39
0,5	16,46	1,53	1,94	5,68
0,25	6,89	0,28	0,42	1,89
0,125	2,41	0,09	0,13	0,36
0,063	0,69	0,03	0,05	0,08
0	0,15	0,02	0,03	0,05



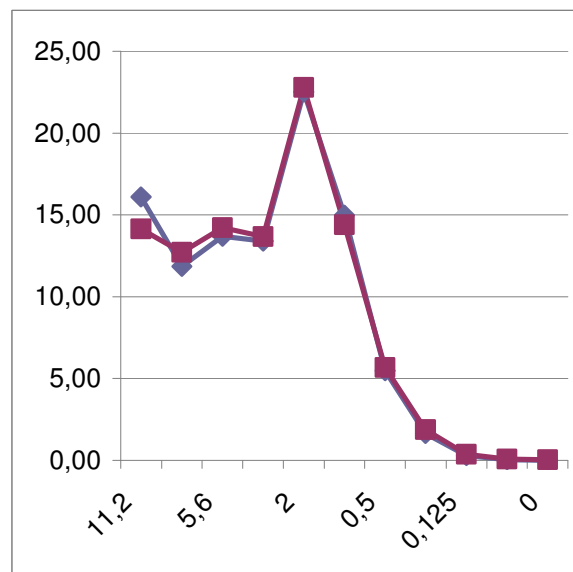
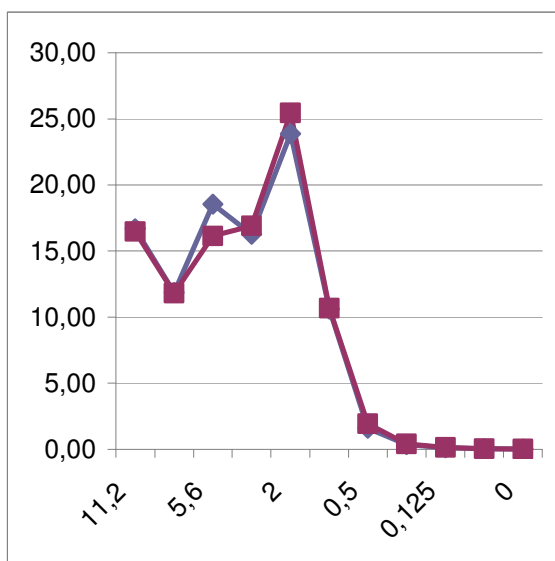
8. ábra Szemeloszlási görbék, július 10., 1. rostálás



9. ábra Szemeloszlási görbék, július 10., 2. rostálás



10. ábra Szemeloszlási görbék, július 31. 1. csapolás. 2. csapolás



11. ábra Szemeloszlási görbék, július 31. 3. csapolás, 4. csapolás

9. Az eredmények értékelése

A salakkezelési kísérletek három periódusban zajlottak. Az első, májusi kísérlet eredményei, részben a bizonytalan üzemmenet, részben a mintavételi hiányosságok miatt tartalmilag nem értékelhetők.

Összehasonlító értékelésre a júliusi két periódus eredményei alkalmasak. Az értékelésnél a salak kémiai összetételét, a szabad CaO tartalmat, és a szemeloszlást tartjuk a legfontosabb paramétereknek.

A kezelt salakok hasznosíthatósága szempontjából, a kémiai összetételből a CaO/SiO₂ hányadossal jellemzett bázikusság az egyik legfontosabb mutató. Ez az érték az összes vizsgált adag összehasonlításában 1,26 és 1,80 értékek között változik. Az alsó és felső érték közötti különbség nem nagy, értékét tekintve, pedig a szokásos acélgyártási primer salakokénál jelentősen kisebb, tehát kis bázikusságú salakoknak minősülnek. Ez a hasznosíthatóság szempontjából kedvező érték, amennyiben a kemence tűzálló bélése elviseli az ilyen minőségű salakokat, akkor ennek a bázikussági intervallumnak a tartása javasolható.

Az alkalmazott analitikai eljárás finomítását követően megbízhatóan értékelhető adatokat a szabad CaO tartalomra a július 31-i gyártásból származó salakokra kaptuk. Ugyancsak a hasznosíthatóság szempontjából ezek rendkívül kedvező kis értékek, amiből következik, hogy ezeknek a salakoknak a térfogatváltozására a tartózkodás, tárolás, és építőanyagként való alkalmazásnál nem kell számítani, és a felhasználás előtt nincs szükség pihentető tárolásra sem.

A szemcse-összetételi vizsgálatok eredményei a július 10-i gyártásnál releváns értékelhető következtetéseket nem engednek meg. Ennek oka lehet a még mindig nem teljesen kiforrott kezelési technológia. Érdekes jelenség, hogy a semmilyen tendenciát nem mutató szemeloszlás a pihentetési idő után végzett ismételt vizsgálatnál jelentős változást mutat, és 2 mm szemnagyság közelében mintegy 40 és 26 %-os maximum mutatkozik, a jellegzetes eloszlási görbén.

A többször módosított kezelési konstrukció eredményeként a július 31-i gyártás salakjai egyenletes értékelhető képet mutatnak. A szemeloszlási görbéken ez az egyenletesség jól nyomon követhető. A 10-11. ábrák a négy adag salakjának a szemcseösszetételét mutatja, a „◇” adatpontokból rajzolt görbe az első rostálás, a „□” adatpontokkal rajzolt görbék pedig az egy hónappal később végzett rostálás eredményeit jellemzik. Az ábrákból kettős típusú következtetés vonható le:

- A görbék az első rostálásnál 22,5 és 36,00 %-os maximumot mutatnak, ami azt jelenti, hogy a teljes vizsgált anyagmennyiség ilyen hányada rendelkezik a hozzá tartozó szemcsenagysággal, ami mind a négy adagnál 1 és 2 mm, tehát nagyon szűk intervallumban jelentkezi. Ugyanez a megállapítás érvényes az egy hónapos pihentetés után elvégzett vizsgálatokra is.
- A pihentetési idő elején és végén elvégzett vizsgálatok eredményeit összehasonlítva az állapítható meg, hogy sem a maximum értékekben, sem a hozzájuk tartozó szemcseméretben lényeges változás nem történt, tehát a tartózkodási idő alatt szemcseaprózódás nem ment végbe. Ez a megállapítás a következő, a későbbiekben igazolásra váró feltételezésekből következik:
 1. A kis bázikusság kedvező hatású.
 2. A kis szabad CaO tartalomból következően duzzadási jelenségek nem lépnek föl.
 3. Az itt nem részletezett, de ismert kezelési technológia a folyékony salak hirtelen megdermedésével üveges fázis megjelenését eredményezi, ami az esetlegesen duzzadásra hajlamosító alkotókat magába zárja.

Összességében - főképpen a július 31-i eredményekre alapozva – az alkalmazott kezelési technológia eredményeként stabil állapot, a pihentetési, tárolási idő alatt sem aprózódó, egyenletesen szemnagyságú, finomszemcsés, jellemzően 1...2 mm szemnagyságú termék keletkezik, amely a bemutatott tulajdonságaiból eredően igényesebb felhasználási területek alapanyaga is lehet.