

CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND METODE DE VALORIFICARE ENERGETICĂ A DEȘEURILOR MENAJERE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

Ing. Mihail Reinhold Wächter

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing.habil Ioana Ionel
Referenți științifici: Prof.univ.dr.ing. Tudor Prisecaru
Prof.univ.dr. Ion Cotăescu
Prof.univ.dr.ing. Petru Negrea

Ziua susținerii tezei: 25.09.2015

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul Școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2015

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
Tel./fax 0256 403823
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității depuse în cadrul **Centrului de Cercetări pentru Mașini și Echipamente Termice, Transporturi și Combaterea Poluării** din facultatea de Mecanică al Universității Politehnica din Timișoara. Cercetarea se concentrează asupra ideii de valorificare a potențialului energetic conținut în deșeurile municipale menajere produse de așezările urbane.

Având în vedere puterea calorică importantă (conținutul energetic), ce caracterizează acest tip de deșeu, și poluarea masivă cu depozitele de deșeuri care nu sunt supuse unui management ecologic, s-a urmărit valorificarea energetică, simultan obținându-se și reducerea riscului de poluare.

Lucrarea se adresează tuturor celor interesați sau care doresc să se specializeze în domeniul sistemului de management integrat al deșeurilor, cu particularizare spre (i) aplicații de valorificare energetică a deșeurilor menajere (conceptul „waste-to-energy”), precum și (ii) depozitarea în condiții ecologice a reziduurilor rezultate în urma incinerării deșeurilor menajere. Pentru valorificarea energetică sunt analizate patru studii de caz, două pentru captarea gazului de depozit și două pentru tratarea termică a deșeurilor, prin incinerarea în masă pe sisteme cu grătare mobile.

Captarea biogazului de depozit este o tehnologie (BAT) aplicabilă depozitelor de deșeuri menajere existente și determină reducerea impactului biometanului (gaz cu efect de seră) produs în depozit asupra poluării atmosferei. Totodată gazul metan captat se poate valorifica în centrale de cogenerare performante.

Tratarea termică prin incinerarea în masă pe sisteme cu grătare mobile a deșeurilor menajere este dedicată valorificării fracției combustibile conținute în masa deșeurilor menajere în amestec, care, în urma arderii, produce o cantitate suficientă de energie pentru generarea aburului cu parametri necesari funcționării unor unități de valorificare energetică în cogenerare.

În urma tratării termice rezultă o cantitate semnificativă de subproduse ale arderii sub formă de zgura și cenușă, precum și alte produse reziduale de la stația de tratare a gazelor de ardere, care sunt depozitate de obicei în haldă, constituindu-se astfel în reale pericole pentru afectarea mediului ambiant (apă, aer, sol). Prin prezenta cercetare s-a propus o metodă nouă de depozitare, prin aplicarea tehnologiei de șlam dens utilizată uzual pentru evacuarea și depozitarea de zgura și cenușa provenită de la termocentralele pe lignit. Conceptul inovator se bazează pe utilizarea cenușii și a produselor de desulfurare aferente incinerării cărbunelui ca material liant pentru stabilizarea prin solidificare a poluanților conținuți în reziduurile aferente incinerării deșeurilor menajere. În acest sens s-au experimentat o serie de rețete, având ca și suport un stand special conceput (proiectat, executat). Rezultatele demonstrează posibilitatea de stabilizare a metalelor grele, conținute în reziduurile aferente incinerării deșeurilor menajere, în roca de cenușă obținută prin tehnologia șlamului dens.

Pentru măsurători, analiza și interpretarea datelor am utilizat echipamentele și aparatura de vârf din dotarea centrului de cercetări menționat și a Institutului de Cercetări pentru Energii Regenerabile – ICER. Rezultatele experimentale obținute sunt valoroase și se încearcă protejarea lor printr-o cerere de brevet.

Consider că Lucrarea este un suport științific pentru cercetările viitoare care vor avea subiect valorificarea surselor de energie regenerabilă sau depozitarea într-un mod ecologic a subproduselor rezultate în urma tratării termice prin incinerare în masă a deșeurilor menajere.

Timișoara, septembrie, 2015

Mihail Reinhold Wächter

Mulțumiri și recunoștință deosebită sunt adresate conducătorului de doctorat **prof.univ.dr.ing. habil Ioana Ionel** pentru îndrumarea și consilierea atentă pe tot parcursul realizării lucrării, curajul și ambiția care mi le-a insuflat.

Mulțumesc, de asemenea membrilor comisiei de doctorat **prof.univ.dr.ing Tudor Prisecaru, prof.univ.dr Ion Cotăescu și prof.univ.dr.ing Petru Negrea** în calitate de referenți ai lucrării și domnului **prof.univ.dr.ing Inocențiu Maniu** în calitate de președinte al lucrării.

Adresez mulțumiri deosebite domnului dipl. ing. Karl Heinrich Bsteh de la Andritz Energy & Environment GmbH și domnilor dipl. ing. Günter Zellinger și dipl. Harald Krainer de la Kärntner Vestmüllverwertungs (KRV) Arnoldstein Austria pentru sprijinul acordat pe tot parcursul desfășurării stagiului de practică Erasmus.

Respect și mulțumiri staff-ului secției tehnologice de la Institutului de Studii și Proiectări Energetice – ISPE, Sucursala Timișoara pentru ajutorul competent și susținerea constantă pe tot parcursul desfășurării studiilor mele de doctorat.

Respect și mulțumiri domnilor ing. Ioan Rad și ing. Szilvester Peter de la SAEM Energomontaj Sucursala Timișoara pentru sprijinul material acordat în realizarea standului experimental mixer hidraulic, utilizat în partea experimentală.

Respect și mulțumiri domnilor ing. Ioan Samuilă și ing. Cristian Bozan de la Compania Locală de Termoficare Timișoara – COLTERM S.A pentru sprijinul material și suportul tehnic acordat „in-situ” la CET Sud Timișoara, pe parcursul experimentelor desfășurate.

Apreciez în final susținerea cercetării prin proiectul POSDRU 1307070, și aduc mulțumiri pe această cale atât Colectivului de Management al Proiectului cât și Școlii Doctorale din UPT.

Mulțumesc familiei, fiicei Alexia și soției Adriana, pentru sprijinul moral și încurajările constante pe tot parcursul efectuării studiilor de doctorat.

Mihail Reinhold Wächter

Cercetări teoretice și experimentale privind metode de valorificare energetică a deșeurilor menajere

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 167, Editura Politehnica, 2015, 152 pagini, 59 figuri, 25 tabele.

ISSN:1842-4937

ISBN:978-606-554-997-5

Cuvinte cheie: deșeuri menajere, incinerare în masă, valorificare energetică, solidificare reziduuri de ardere, depozitare ecologică reziduuri.

Rezumat,

Subiectul abordat și concluziile cercetării raspund unor probleme de maximă actualitate privind valorificarea energetică a deșeurilor menajere și tratarea reziduurilor aferente incinerării prin solidificare, în vederea reducerii iminentului impact de poluare asupra mediului înconjurător. Cercetarea are la bază patru studii de caz și numeroase experimente realizate pe stand, în urma cărora, se propune o soluție inovatoare de tratare prin solidificare a reziduurilor aferente incinerării în masă a deșeurilor menajere.

Tema abordată interdisciplinar și concluziile desprinse îmbină aspecte legate de managementul ecologic al deșeurilor municipale, coroborate cu posibilități reale de protejare a mediului.

CUPRINS

Lista lucrărilor științifice publicate	8
Notații, abrevieri, acronime	10
Lista de tabele cuprinse în teză.....	12
Lista de figuri cuprinse în teză	13
1. INTRODUCERE	16
1.1. Motivația alegerii temei de cercetare.....	16
1.2. Importanța și actualitatea temei.....	17
1.2.1 Valorificarea energetică a deșeurilor municipale prin tratare termică	18
1.2.2 Gestionarea reziduurilor provenite de la incinerarea deșeurilor municipale ...	19
1.3. Încadrarea temei în contextul preocupărilor existente la nivel internațional și național.....	19
1.4. Obiectivele științifice propuse pentru rezolvare în cadrul cercetării.....	20
1.5. Metoda de cercetare abordată și metodologia cercetării.....	21
2. METODE DE VALORIFICARE A DEȘEURILOR MENAJERE.....	23
2.1. Caracterizarea energetică a deșeurilor menajere	23
2.2. Particularitățile valorificării energetice a deșeurilor menajere	28
2.2.1 Valorificarea energetică prin captarea biogazului	29
2.2.2 Valorificarea energetică prin tratare termică	32
2.3. Reziduurile aferente proceselor de valorificare energetică prin incinerare.....	35
3. CAPTAREA BIOGAZULUI DIN DEPOZITELE DE DEȘEURI MENAJERE	37
3.1. Metoda activă și metoda pasivă de captare biogaz.....	37
3.2. Metode de separare a metanului din biogazul de depozit	40
3.2.1 Metoda de separare prin adsorbție - PSA.....	41
3.2.2 Metoda de separare prin membrană.....	42
3.3. Studiu de caz 1 – captarea biogazului de la depozitul pentru deșeuri menajere Pata Rât din județul Cluj	43
3.4. Studiu de caz 2– captarea biogazului de la depozitul pentru deșeuri menajere Dej din județul Cluj	50

4. TRATAREA TERMICĂ A DEȘEURILOR MENAJERE PRIN INCINERARE..... 53

4.1. Mecanismul procesului de incinerare a deșeurilor menajere	53
4.1.1 Etapa de combustie primară	54
4.1.2 Etapa de combustie secundară	55
4.1.3 Reacțiile chimice de combustie. Aerul necesar arderii.	57
4.2. Incinerarea deșeurilor menajere prin arderea în masă.....	61
4.3. Incinerarea deșeurilor menajere prin arderea în pat fluidizat.....	63
4.4. Incinerarea deșeurilor menajere în cuptoare rotative	66
4.5. Studiu de caz 3 - incineratorul pentru deșeuri menajere de la KRV Arnoldstein - Austria	68
4.5.1 Implementarea proiectului de incinerare a deșeurilor menajere	68
4.5.2 Descrierea fluxului tehnologic al unității de incinerare	69
4.5.2.1 Sistemul de stocare și alimentare deșeuri menajere	70
4.5.2.2 Sistemul de incinerare deșeuri menajere	72
4.5.2.3 Sistemul de valorificare energetică.....	75
4.5.2.4 Sistemul de tratare gaze de ardere	77
4.5.3 Eficiența energetică a incineratorului.....	83
4.6. Studiu de caz 4 - incineratorul pentru deșeuri menajere din Timișoara	88
4.6.1 Inițierea proiectului de incinerare a deșeurilor menajere.....	88
4.6.2 Premizele de dimensionare a instalației de incinerare deșeuri	89
4.6.3 Descrierea fluxului tehnologic al unității de incinerare	92
4.6.3.1 Sistemul de recepție, stocare și alimentare deșeuri menajere	93
4.6.3.2 Sistemul de incinerare deșeuri menajere	94
4.6.3.3 Sistemul de valorificare energetică.....	96
4.6.3.4 Sistemul de tratare gaze de ardere	97
4.6.4Eficiența energetică a incineratorului.....	100

5. GESTIONAREA REZIDUURILOR PROVENITE DIN INCINERAREA DEȘEURILOR MENAJERE 101

5.1. Particularitățile tratării reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor.....	101
5.2. Metode de tratare a reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor	104
5.2.1 Metoda de extracție și separare a poluanților	104
5.2.2Metoda de stabilizare chimică a poluanților	105
5.2.3Metoda de solidificare a poluanților	106
5.2.4 Metoda de tratare termică a poluanților.....	107

5.3. Contribuții privind metoda de tratare prin solidificarea reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor menajere.....	109
5.3.1Aspecte relevante privind metoda propusă.....	109
5.3.2 Reacțiile chimice de cementare care stau la baza tehnologiei de solidificare prin metoda șlamului dens	110
5.3.3Proiectarea și dimensionarea standului experimental mixer hidraulic.....	112
6. EXPERIMENTE PRIVIND TRATAREA REZIDUURILOR PRIN SOLIDIFICARE CU METODA ȘLAMULUI DENS	117
6.1. Materiale utilizate și metoda experimentală aplicată	117
6.1.1 Compoziția chimică a cenușilor utilizate.....	117
6.1.2Prepararea probelor investigate și pregătirea analizelor	120
6.2. Rezultatele testelor de analiză pentru probele investigate.....	122
6.2.1 Analiza structurii și a formelor de cristalizare	122
6.2.2Analiza concentrațiilor de metale grele în levigat	126
6.3. Interpretarea rezultatelor obținute	128
6.4. Aplicabilitatea rezultatelor obținute.....	129
7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PROPRI	130
7.1. Atingerea obiectivelor de cercetare științifică propuse	130
7.2. Concluzii privind rezultatele cercetării efectuate	133
7.3. Direcțiile de cercetare rămase deschise pentru continuarea cercetărilor.....	136
7.4. Contribuții propri referitoare la tema cercetată.....	139
Bibliografie	142
Anexa 1.....	150

Lista lucrărilor științifice publicate

I. Lucrări științifice publicate în reviste ISI

1. M.R. Wächter, I. Ionel, A. Negrea, "New concept for landfill disposal of municipal solid waste incineration residues", *Journal of Environmental Protection and Ecology*, vol. 14, Issue 3, pp. 947-955, 2013, JEPE.
2. I. Neamț, M.R. Wächter, I. Ionel, I. Vlaicu, "Energy recovery from sludge with organic loads resulted from waste water treatment plants", *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 12, pp. 883-889, 2013, EEMJ.
3. M.R. Wächter, I. Ionel, A.Negrea, D. Cebrucean, V. Mânzatu, M. Ciopec, "Leaching investigation of coal fly ash and dry desulphurisation residues by stabilization into ash rock", *Revista de chimie*, vol. 66, nr.11/2015

II. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate Web of Science-WoS (ISI) Proceedings

1. M.R. Wächter, I. Ionel, "Integration of solid waste incineration residues into dense slurry technology", in *Proc. 4th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, Siofok, Hungary, 2013, IEEE Xplore.

III. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI

1. M.R Wächter, I. Ionel, I. Samuilă, "Energy recovery from municipal solid waste incineration. Timișoara case study", *Buletinul AGIR*, Pages 130-133, Supliment 1/2013, BDI: Index Copernicus International, Academic Keys, getCited.
2. M.R Wächter, A.R Wächter, I. Ionel, M.D Vasilescu, L.A. Varga, "Solidification of incineration residues through dense slurry hydraulic mixing" *Buletinul AGIR* nr. 3/2015, Pages 125-128, BDI: Index Copernicus International, Academic Keys, getCited.
3. M.R Wächter, I. Ionel, P. Negrea, M.D Vasilescu, A.R Wächter, "Landfilling of waste incineration residues by stabilizatio-solidification" *Buletinul AGIR* nr. 3/2015, Pages 129-133, BDI: Index Copernicus International, Academic Keys, getCited.

IV. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale (Proceedings) din străinătate

1. M.R Wächter, I. Neamt, I. Ionel, "Solid waste incineration of residues – a clean technology", in *Proc. 38th Annual Congress of American Romanian Academy of Arts and Science*, Pasadena, California, USA, July 23-27, pp.127-137, ISSN 1453-1674, ARA – 2014.
2. M.R Wächter, I. Neamt, I. Ionel, "Aplication of oxigen enriched air on grate incinerators" in *Proc. 4th International Conference Ecology of Urban Areas 2014 (URBAN ECO 2014)*, Zrenjanin, Serbia, October 9-10, pp.140-148.

V. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice

1. M.R.Wächter, A.R. Wächter, L.A. Varga, "Flue gas cleaning of municipal solid waste incinerators", AT20_S Energia&Transportul. Implicațiile asupra calității aerului, 23-26.09.2014, Ateliere tematice ID 137070-ATTRACTING.
2. M.R. Wächter, "Integrarea reziduurilor rezultate în urma incinerării deșeurilor menajere în tehnologia șlamului dens", Earth Day 2015, 22.04.2015, Timișoara.

Notații, abrevieri, acronime

Simbol/ Abreviere/ Notație	Semnificație
APC	Air Pollution Control – unitate de epurare a gazeleor de ardere
BAT	Best Available Techniques – Tehnologie de ultimă oră
MSW	Municipal solid waste – deșeuri menajere
MSWI	Municipal solid waste incinerator– incinerator deșeuri menajere
CHP	Combined heat and power – cogenerare
VOCs	Volatile Organic Compound – substanță organică volatilă
PCDD/F	Polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans – dioxine/furani
PCB	Polychlorinated biphenyl – bifenil
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
RDF	Refuse Derived Fuels – combustibili derivați
US EPA	United States Environmental Protection Agency
IGNIG	Instytut Nafty i Gazu Polonia
LFG	Landfill gas – gaz de depozit (biogaz)
CAA	Clean Air Act
NSPS	New Resource Performance Standards
NCV	Net calorific value – putere calorifică inferioară netă
Pl_{ef}	Plant efficiency – eficiența incineratorului de deșeuri
R1	Eficiența energetică a incineratorului de deșeuri
Δp	Pierdere de presiune
PSA	Pressure Swing Adsorption – separare prin adsorbție sub presiune
RMA	Rata medie de acceptare a deșeurilor în depozit
G_{LFG}	Producția specifică de gaz de depozit
Q_{LFG}	Capacitatea totală de captare gaz de depozit
λ	Coeficientul excesului de aer de ardere
UTG	Unitate de tratare a gazelor de ardere
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
KRV	Kärntner Restmüllverwertungs–Compania de valorificare a deșeurilor
KELAG	Kärntner Elektrizitäts Aktiengesellschaft

SYNCOM	Synthetic Combustion
SEN	Sistem energetic național
CET	Centrală electro-termică pe cărbune
FA	Fly ash – cenușă de electrofiltru (zburătoare)
FGD	Flue gas desulphurisation
SD	Șlam dens
S	Cantitate substanță solidă
W	Cantitate apă
FRX	Flourescence Radiation X - fluorescență în raze X
XRD	X-Ray Diffraction – difracție în raze X
ICDD	International Center for Diffraction Data
VMA	Valori maxime admise

Lista de tabele cuprinse în teză

Nr. crt.	Nr. de ordine	Denumirea tabelului	Pag.
1	Tabelul 2.1	Analiza imediată a deșeurilor menajere	26
2	Tabelul 2.2	Analiza chimică elementară a deșeurilor menajere	27
3	Tabelul 2.3	Valorile parametrilor k și L ₀ conform CAA și AP42	30
4	Tabelul 2.4	Categoria masei organice și timpul de înjumătățire	31
5	Tabelul 2.5	Cantitățile specifice de reziduuri provenite din incinerarea deșeurilor	36
6	Tabelul 3.1	Biogazul produs în depozitul Pata Rât	44
7	Tabelul 3.2	Biogazul produs în depozitul de la Dej	51
8	Tabelul 4.1	Distribuția sectoarelor pe grătarul mobil de ardere	73
9	Tabelul 4.2	Valorile emisiilor în atmosferă la unitatea de incinerare KRV	82
10	Tabelul 4.3	Bilanțurile masice și energetice de la incineratorul KRV Arnoldstein	83
11	Tabelul 4.4	Breviar calcul NCV la incineratorul KRV Arnoldstein	84
12	Tabelul 4.5	Valorile NCV calculate pentru 50 de incineratoare MSWI investigate	85
13	Tabelul 4.6	Valorile de referință NCV funcție de tipul deșeurilor	85
14	Tabelul 4.7	Breviar calcul PI_{ef} la incineratorul de deșeuri KRV Arnoldstein	86
15	Tabelul 4.8	Valorile PI_{ef} calculate pentru 73 de incineratoare MSWI investigate	86
16	Tabelul 4.9	Breviar calcul R1 pentru incineratorul de deșeuri KRV Arnoldstein	87
17	Tabelul 4.10	Cracteristicile de calcul ale combustibilului mixt	90
18	Tabelul 4.11	Parametrii de încărcare a unității de incinerare	91
19	Tabelul 5.1	Caracteristicile procedeeleor de tratare a reziduurilor	108
20	Tabelul 5.2	Caracteristici tehnice stand experimental	115
21	Tabelul 6.1	Compoziția oxidică a cenușii de cărbune	118
22	Tabelul 6.2	Compoziția rezidului de desulfurare	118
23	Tabelul 6.3	Conținutul de metale grele în reziduurile toxice investigate	119
24	Tabelul 6.4	Conținutul de metale grele în levigat după 24h	126
25	Tabelul 6.5	Variația în timp a concentrației de metale grele în levigat	127

Lista de figuri cuprinse în teză

Nr. crt.	Nr. ordine	Tipul figurii			Denumirea figurii	Pag.
		Imagine	Grafic	Schemă		
1	Fig.2.1		x		Cantitățile de deșeuri municipale produse în EU-27	24
2	Fig.2.2			x	Compoziția chimică elementară a elementelor combustibile	27
3	Fig.2.3			x	Sistemul de management integrat al deșeurilor	28
4	Fig.2.4		x		Stagiile descompunerii organice a deșeurilor menajere	29
5	Fig.2.5			x	Bilanțul energetic al incinerării deșeurilor menajere	34
6	Fig.3.1			x	Concept captare valorificare/neutralizare biogaz de depozit unitate de valorificare biogaz de depozit	38
7	Fig.3.2			x	Sondă captare biogaz depozit: a-verticală, b-orizontală	39
8	Fig.3.3			x	Raza de influență a sondei de captare biogaz depozit	39
9	Fig.3.4			x	Schema de principiu a metodei de separare CO ₂ prin adsorbție PSA	41
10	Fig.3.5			x	Schema de principiu a metodei de separare CO ₂ prin membrană	42
11	Fig.3.6		x		Eșalonarea în timp a cantității de biogaz produsă în depozit Pata Rât	44
12	Fig.3.7			x	Distribuția sondelor de captare biogaz la depozitul Pata Rât	45
13	Fig.3.8	x		x	Execuția și montajul sondei verticale active de captare biogaz	48
14	Fig.3.9			x	Principiul de funcționare al unității de ardere gaz de depozit	49
15	Fig.3.10		x		Eșalonarea în timp a cantității de biogaz produsă în depozit Dej	51
16	Fig.3.11			x	Execuția și montajul sondei verticale pasive de captare biogaz	52
17	Fig.4.1		x		Eficiența distrugerii poluanților funcție de condițiile de ardere	56

14 Lista de figuri cuprinse în teză

Nr. crt.	Nr. ordine	Tipul figurii			Denumirea figurii	Pag.
		Imagine	Grafic	Schemă		
18	Fig.4.2		x		Variația temperaturii funcție de excesul de aer	59
19	Fig.4.3			x	Principiul de funcționare al incineratoarelor cu grătare mobile	61
20	Fig.4.4			x	Tipurile principale de grătare mobile	63
21	Fig.4.5			x	Principiul de funcționare al incineratoarelor în pat fluidizat circulant	64
22	Fig.4.6			x	Tipurie combustiei în patului fluidizat	65
23	Fig.4.7			x	Principiul de funcționare al incineratorului rotativ	66
24	Fig.4.8			x	Schema de concept a unității de incinerare KRV-Arnoldstein	69
25	Fig.4.9			x	Sistem alimentare deșeuri KRV Arnoldstein	71
26	Fig.4.10			x	Conceptul SYNCOM-Plus® (Synthetic Combustion – Plus)	73
27	Fig.4.11			x	Schema de control aer primar ardere KRV Arnoldstein	74
28	Fig.4.12			x	Schema de producție oxigen KRV Arnoldstein	75
29	Fig.4.13			x	Schema de valorificare energetică KRV Arnoldstein	76
30	Fig.4.14			x	Tratarea gazelor de ardere în patru trepte KRV Arnoldstein	77
31	Fig.4.15			x	Sistem scrubber uscat KRV Arnoldstein	78
32	Fig.4.16			x	Schemă epurare gaze în filtru cu carbon activ KRV Arnoldstein	79
33	Fig.4.17			x	Schemă epurare gaze în SCR – KRV Arnoldstein	80
34	Fig.4.18		x		Diagrama capacității de incinerare MSWI Timișoara	91
35	Fig.4.19			x	Schema de concept a unității de incinerare MSWI Timișoara	92
36	Fig.4.20			x	Sistem alimentare deșeuri MSWI Timișoara	93
37	Fig.4.21			x	Sistem alimentare aer ardere MSWI Timișoara	95
38	Fig.4.22			x	Sistem acustic măsurare temperatură	96
39	Fig.4.23			x	Schema de valorificare energetică MSWI Timișoara	97

Nr. crt.	Nr. ordine	Tipul figurii			Denumirea figurii	Pag.
		Imagine	Grafic	Schemă		
40	Fig.4.24		x		Variația reducerii NOx funcție de temperatură	98
41	Fig.4.25			x	Tratarea gazelor de ardere MSWI Timișoara	98
42	Fig.5.1			x	Producerea fenomenului de levigare	102
43	Fig.5.2		x		Comportarea în timp pentru un depozit de deșeuri menajere	103
44	Fig.5.3			x	Elementele componente ale unui mixer hidraulic industrial	112
45	Fig.5.4	x		x	Realizarea mixerului hidraulic experimental la scară de laborator	114
46	Fig.5.5			x	Dimensiunile proiectării mixerului hidraulic experimental	115
47	Fig.5.6	x			Omogenizarea amestecului bifazic solide/apă	116
48	Fig.5.7	x			Experimente „on-site”	116
49	Fig.6.1	x			Matriță turnare probe investigare	120
50	Fig.6.2				Pregătirea probelor pentru analiză	121
51	Fig.6.3		x		Analiza XRD roca de cenușă inițială (de referință)	122
52	Fig.6.4a		x		Analiza XRD roca de cenușă – Proba 1	123
53	Fig.6.4b		x		Analiza XRD roca de cenușă – Proba 2	124
54	Fig.6.4c		x		Analiza XRD roca de cenușă – Proba 3	124
55	Fig.6.4d		x		Analiza XRD roca de cenușă – Proba 4	125
56	Fig.6.5		x		Evoluția Cr și Ni în timp	128
57	Fig.7.1		x		Evoluția energiilor introduse în sistem Ef și Ei	136
58	Fig.7.2		x		Evoluția energiei utile produsă de unitatea de incinerare Ep	137
59	Fig.7.3		x		Evoluția eficienței energetice R1 - incineratorul KRV Arnoldstein	138
Total 59 figuri		5 imagini	18 grafice	36 imagini		

1. INTRODUCERE

1.1. Motivația alegerii temei de cercetare

În 2006 am absolvit Facultatea de Mecanică – UPT, secția Mașini și Echipamente Termice, după care m-am angajat să urmez cursurile de master Energoecologie în Domeniul Termic și al Vehiculelor de Transport, din cadrul aceleiași instituții, absolvind în 2008. Din 2006 până în prezent sunt angajat la Institutul de Studii și Proiectări Energetice – ISPE S.A, secția Tehnologie, post ce l-am obținut prin concurs în urma absolvirii studiilor de licență.

Pe parcursul experienței acumulate de-a lungul carierei mele ingineresti am acumulat cunoștințe din domeniul energetic cu preponderență în re tehnologizarea termocentralelor pe cărbune din Sistemul Energetic Național, pentru limitarea emisiilor poluante în mediul ambiant conform limitelor impuse de standardele europene.

La ora actuală în România, implementarea sistemului de management integrat al deșeurilor este foarte întârziat, problema gestionării deșeurilor menajere fiind una de actualitate ce necesită găsirea unor soluții fezabile cât mai repede, având în vedere normele de poluarea a mediului ambiant impuse de Uniunea Europeană. Pe plan mondial, cea mai răspândită și eficientă metodă de gestionarea a deșeurilor menajere este valorificarea energetică a acestora cumoscută sub numele de „waste-to-energy”. Metoda se bazează pe exploatarea conținutului energetic al deșeurilor prin incinerare. Dacă se face o paralelă comparativă între exploatarea energetică a cărbunelui și cea a deșeurilor menajere se observă că tehnologiile de incinerare sunt aproape identice, fiind axate practic pe aceleași principiu termodinamic de bază – Clausius Rankine. În ambele cazuri în urmă procesului de incinerare rezultă cantități semnificative de subproduse de ardere sub forma de zgură și cenușă precum și reziduuri provenite de la stațiile de tratarea gazelor de ardere. Aceste subproduse de ardere sunt depozitate în haldă, care dacă nu este gestionată corect reprezintă un factor de poluare a mediului înconjurător prin emisii de praf în aer și contaminarea pânzei de apă freatică cu metale grele, produsă prin fenomenul de levigare datorat apei meteorice. Metoda depozitării în haldă sub formă de șlam dens (fluid dens) este o metodă de stabilizare a reziduurilor provenite de la termocentralele pe lignit, care a fost implementată cu succes și în termocentralele din România (CET Sud Timisoara, CET Craiova II, CET Ișalnița, CET Rovinari, CET Turceni).

În urma experienței acumulate pe parcursul proiectelor în care am fost implicat, am văzut posibilitatea de a stabili reziduurile provenite de la incineratoarele pentru deșeuri menajere prin implementarea tehnologiei de șlam dens, fapt care m-a determinat să aprofundez această idee prin studiile desfășurate în cadrul unei cercetări de doctorat. În prezent Primăria Municipiului Timișoara a demarat un proiect de valorificare energetică a deșeurilor menajere, urmând ca în viitorul apropiat să se construiască primul incinerator pentru deșeuri menajere din România, având locația CET Sud Timișoara.

Ținând cont de cele expuse anterior, cercetarea mea teoretică, aplicată și experimentală s-a axat pe valorificarea energetică a deșeurilor menajere prin

incinerare și stabilizarea reziduurilor rezultate, analizând diferite tehnologii aplicate în acest sens, promovate la nivel european și mondial. Tema și subiectul care fac obiectul tezei de doctorat sunt de actualitate cu posibilitate ridicată de aplicare la scară industrială. Consider că prin aportul modest adus prin prezenta lucrare voi contribui și voi aduce un răspuns în susținerea valorificării energetice a deșeurilor menajere prin incinerare precum și o soluție pentru depozitarea reziduurilor în condiții ecologice.

1.2. Importanța și actualitatea temei

Creșterea cantităților de deșeurii menajere este direct proporțională cu trendul de creștere a populației în mediul urban. În ultimele decenii s-au făcut eforturi considerabile pentru găsirea unor soluții cât mai eficiente și sustenabile pe termen mediu și lung, în ce privește gestionarea deșeurilor menajere într-o manieră ecologică cu impact minim asupra mediului ambiant [1]. Acest fapt se reflectă în scăderea limitelor de poluare impuse prin legislația emisă de Uniunea Europeană, care sunt din ce în ce mai restrictive [1,2,4,8].

Sistemul de management integrat al deșeurilor are rolul de a oferi soluții în acest sens. Sub acest aspect, tratarea termică a deșeurilor menajere reprezintă o soluție fezabilă, cu impact pe termen mediu și lung, pentru reducerea semnificativă a cantității de depozitare în haldă a deșeurilor, și totodată permite igienizarea acestora. În cazul incineratoarelor dotate cu tehnologii moderne volumul deșeurilor este redus cu 95-96 %, funcție de compoziția și gradul de reciclare al acestora [1, 2]. Reciclarea selectivă a deșeurilor menajere este puternic influențată de participarea populației în acest sens, astfel pe pimele locuri, cu peste 60% din deșeurii reciclate, se află Germania și Austria, iar pe ultimul loc este România cu doar 1%. Având în vedere limitarea cantității de depozitare în haldă a deșeurilor menajere impusă prin normele europene, incinerarea deșeurilor reprezintă soluția optimă.

Pe de altă parte găsirea unor surse alternative de energie este de asemenea un subiect de actualitate foarte intens dezbătut de echipele de cercetare din întreaga lume [1,2, 6, 15]. Ca răspuns în rezolvarea acestor probleme s-a dezvoltat conceptul de „waste-to-energy”, care s-a dovedit a fi o soluție sustenabilă în acest sens. Acest concept presupune valorificarea potențialului energetic conținut în deșeurii, într-o manieră ecologică cu impact minim asupra mediului ambiant. Implementarea conceptului atrage implicit dezvoltarea unor tehnologii moderne de incinerare, de tratare a gazelor de ardere și depozitare în haldă a subproduselor arderii.

Gestionarea subproduselor arderii rezultate în urma procesului de incinerare a deșeurilor menajere reprezintă de asemenea un subiect de actualitate. În urma procesului de incinerare rezultă o cantitate semnificativă de zgură și cenușă precum și reziduuri provenite de la stația de tratare a gazelor de ardere. Cea mai mare parte a acestor reziduuri sunt depozitate în haldă. Depozitarea în haldă ridică problemele legate de contaminarea pământului de apă freatică prin fenomenul de levigare, și a aerului prin emisii de praf [1, 5, 8, 39, 44]. Pentru rezolvarea acestor probleme există mai multe metode de gestionare a cenușii cum ar fi sinterizare, vitrificare sau stabilizare/solidificare. Metoda de stabilizare a reziduurilor provenite de la incinerarea deșeurilor menajere s-a dovedit a fi soluția cea mai fezabilă. Această metodă se bazează pe modificarea structurii materialului depozitat prin utilizarea unor lianți care înglobează și fixează elementele poluante [28, 39, 42, 44, 47, 50, 51, 54]. Totodată această metodă oferă și o creștere a stabilității materialului depozitat.

1.2.1 Valorificarea energetică a deșeurilor municipale prin tratare termică

Valorificarea energetică a deșeurilor menajere se axează pe exploatarea potențialului energetic conținut de acestea exprimat prin puterea calorifică. Metoda de exploatare este similară cu cea a termocentralelor, căldura obținută în urma procesului de incinerare este utilizată pentru producerea aburului. Funcție de parametrii aburului obținut, se poate obține fie energie electrică printr-un sistem turbină-generator, fie energie termică pentru termoficare printr-un sistem cu schimbătoare de căldură.

Deșeurile sunt încadrate în categoria resurselor energetice secundare combustibile, ce reprezintă cantitățile de energie sub toate formele care conțin un potențial energetic ce poate fi utilizat în trei direcții: termică, electroenergetică și combinată. Valorile medii pentru parametrii energetici rezultați în urma incinerării deșeurilor menajere pentru unități moderne de incinerare sunt [10]:

- Puterea calorifică inferioară a deșeurilor (H_i): 9.5–10 MJ/kg,
- Randamentul de producerea a aburului: 65–76%,
- Cantitatea aburului pe tona de deșeu incinerat: 1.9–2.4 tone,
- Energia electrică produsă pe tona de deșeu incinerat: 350–400 kWh.

Conform statisticilor, puterea calorifică a deșeurilor menajere are o tendință de creștere în viitor, fapt dovedit prin cercetări ce determină influența diverselor cote de reciclare asupra valorii calorice a deșeurilor reziduale [10].

Metodele de tratare termică aplicate pentru incinerarea deșeurilor sunt în funcție de natura și tipul deșeurilor. Tema din prezenta lucrare tratează tipul deșeurilor menajere generate de așezările urbane. Pentru tratarea termică a acestui tip de deșeuri se pretează una din următoarele metode/tehnologii de incinerare [1,2,3,8,10,14]:

1. *Incinerarea în masă* – este cel mai răspândit procedeu de incinerare pe plan mondial în ce privește valorificarea energetică a deșeurilor menajere. Particularitatea acestui procedeu constă în menținerea arderii deșeurilor pe un sistem cu grătare mobile, la care aerul primar de ardere este insuflat prin partea inferioară a grătarului. Timpul de incinerare completă a deșeurilor fiind cuprins între 4 – 6 ore, cronometrat de la introducerea deșeurilor pe grătar până la evacuarea zgurii. Deșeurile nu necesită procesare prealabilă înainte de incinerare.
2. *Incinerarea în pat fluidizat* – combustia particulelor de deșeuri are loc prin antrenarea acestora în patul fluidizat din camera de ardere, care poate fi prin metoda de injecție sau prin dispersie. Alimentarea cu deșeuri a focarului se face odată cu introducerea aerului necesar arderii. Timpul de incinerare completă a deșeurilor în acest caz este de intervalul minutelor. Deșeurile necesită o mărunțire pentru a putea fi insulfate odată cu aerul necesar arderii.
3. *Incinerarea în cuptoare rotative* – este cel mai răspândit procedeu de incinerare pentru deșeurile toxice. Particularitatea acestui procedeu constă în arderea deșeurilor într-un cuptor rotativ, care menține în mișcare permanentă masa deșeurilor incinerate asigurând prin acest fel o ardere completă a deșeurilor. Timpul de incinerare completă al deșeurilor este cuprinsă între 30-90 minute. Deșeurile nu necesită procesare prealabilă înainte de incinerare.

Alegerea și implementarea metodei optime de tratare termică a deșeurilor menajere se face în urma unui studiu de fezabilitate bazat pe condițiile existente

locale care diferă de la caz la caz. Eficiența energetică maximă se obține în cazul aplicării ciclurilor combinate CHP (combined heat and power), caz în care eficiența energetică poate atinge valoarea 70–85% [1-pag 84].

1.2.2 Gestionarea reziduurilor provenite de la incinerarea deșeurilor municipale

În urma procesului de incinerare a deșeurilor menajere rezultă inevitabil reziduuri sub formă solidă în cantități semnificative, care concentrează elementele poluante conținute în deșeu. Raportate la tona de deșeu incinerat cantitățile reziduuri rezultate sunt [1, 8]:

- Zgura 20–30% – materie compusă în principal de fracția necombustibilă a deșeurilor, colectată din zona grătarului mobil de ardere;
- Cenușa grosieră 4-10% – rezultată în urma reacțiilor chimice de combustie, fiind antrenată în gazele de ardere, se depune în focar și pe drumul de evacuare al gazelor de ardere în zona supraîncălzitoarelor de abur, zona preîncălzitoarelor de aer și zona economizorului;
- Cenușa fină 1–3% – particule fine de cenușă colectate înaintea de intrarea gazelor în zona de tratare (curățire și eliminarea a polunaților);
- Reziduuri specifice sistemelor de curățire a gazelor de ardere 2–5% – formate din material absorbant reacționat și nereacționat utilizat în tratarea gazelor de ardere.

Funcție de compoziția deșeurilor incinerate și de condițiile (temperaturile) de incinerare, reziduurile de ardere conțin poluanți în diferite proporții cum sunt: CO, HCl, HF, SO₂, NO_x, VOCs, PCDD/F, PCBs și metale grele [1]. Aceste reziduuri nu pot fi utilizate în alte aplicații industriale, fapt pentru care sunt depozitate în haldă. Depozitarea în haldă trebuie făcută într-o manieră care să respecte normele de poluare impuse prin legislația în vigoare.

Obiectivul pe termen scurt și mediu al depozitării în haldă este de a împiedica contaminarea mediului cu acești poluanți. Având în vedere temperatura înaltă (800–1450°C) la care se formează aceste reziduuri, face ca acestea să fie instabile din punct de vedere termodinamic în condițiile mediului ambiant, fiind foarte reactive în prezența umezelii [8]. Apa meteorică (ploi, zăpadă) care intră în contact cu depozitul de reziduuri, reprezintă mediul de transfer al poluanților către mediul ambiant. Stabilizarea respectiv inertizarea acestor depozite este absolut necesară.

1.3. Încadrarea temei în contextul preocupărilor existente la nivel internațional și național

La nivel european, raportat la statele membre comunității EU, gradul de utilizare a metodei de incinerare a deșeurilor ca parte integrantă a managementului deșeurilor, variază de la stat la stat, gradul de aplicare fiind cuprins între 0 și 62 % raportat la cantitatea totală de deșeuri menajere produse [1]. Astfel pentru statele membre EU-15 cantitatea anuală de deșeuri menajere ce pot fi tratate termic este de cca 200 milioane tone pe an, iar capacitatea de incinerare instalată este de 50 milioane tone pe an, majoritatea incineratoarelor fiind instalate în țările puternic industrializate [1]. Implementarea și extinderea aplicării acestei tehnologii, în țările aderente la Comunitatea Europeană după EU-15 (2003), este doar o chestiune de timp, fiind impuse prin legislația europeană. Directivele europene care impun și susțin această implementare sunt:

- 89/369/EEC normele impuse pentru incineratoarele noi;
- 89/429/EEC norme impuse pentru incineratoarele existente;
- 94/67/EC norme impuse pentru incineratoarele pentru deșeuri periculoase, care include și co-incinerarea deșeurilor menajere;
- 2000/76/EC norme impuse pentru incinerarea deșeurilor.

Directiva 2000/76/EC are rolul de a reglementa cerințele minime în ce privește limitele de poluare admise, monitorizarea acestora și condițiile de operare specifice.

La nivel național implementarea sistemului integrat de gestionarea al deșeurilor se desfășoară prin Programul Operațional Sectorial pentru Mediu (POS Mediu)–Axa prioritară 2 „Dezvoltarea sistemelor de management integrat al deșeurilor și reabilitarea siturilor contaminate istoric”. Planul Național de Gestionarea al Deșeurilor din România este elaborat în baza prevederilor legislației europene și naționale în domeniu:

- Directiva nr.99/31/EEC privind depozitarea deșeurilor;
- Directiva cadru privind deșeurile 75/442/EEC amendată directiva nr.91/156 EEC;
- Directiva nr. 91/689/EEC privind deșeurile periculoase.

Directivele europene menționate mai sus sunt transpuse în legislația națională prin Ordonanța de Urgență a Guvernului 78/2000 privind regimul deșeurilor, abrogată prin Legea 211 din 15 noiembrie 2011. Planul Național de Gestionare al Deșeurilor se aprobă prin hotărâre de guvern și se revizuieste o dată la cinci ani. În HG 856/2002 este prezentată lista de clasificare în categorii a deșeurilor conform cerințelor europene de clasificare. Această hotărâre obligă agenții economici de a-și ține evidența deșeurilor și de a le raporta la cererea autorităților județene de mediu (APM). România raportează datele privind deșeurile către EUROSTAT și la Agenția Europeană de Mediu (prin rețeaua EIONET) [63]. Centralizarea datelor este necesară în scopul analizei și determinării soluțiilor optime de gestionare a deșeurilor pe diferite zone.

1.4. Obiectivele științifice propuse pentru rezolvare în cadrul cercetării

Cercetarea științifică desfășurată pe parcursul studiilor de doctorat, are la bază ideea de valorificare și exploatare a puterii calorifice conținute în deșeurile municipale menajere produse de așezările urbane. Cercetarea pornește de la premiza că deșeurile menajere pot fi privite sub aspectul unui combustibil care poate fi exploatat energetic foarte eficient. Compoziția heterogenă a materiei din care este compusă masa deșeurilor menajere implică utilizarea unor metode și tehnologii specifice pentru fiecare categorie de deșeu. Tehnologiile de incinerare aplicate în acest scop sunt în continuă dezvoltare în ce privește optimizarea și eficientizarea procesului de combustie, precum și reducerea emisiilor poluante la un nivel foarte scăzut.

Poluanții conținuți în deșeurile incinerate sunt transferați și concentrați în reziduurile rezultate în urma reacțiilor chimice de combustie. Neutralizarea și stabilizarea reziduurilor rezultate în urma procesului de ardere este o problemă rezultantă a procesului de incinerare care reprezintă principalul factor de poluare al tratării termice pentru deșeurile menajere, cu impact pe termen scurt, mediu și lung. Imposibilitatea utilizării acestora în alte aplicații industriale conduce la depozitarea reziduurilor în haldă.

Obiectivele științifice urmărite în cercetarea teoretică, aplicată și experimentală pot fi grupate în două categorii principale:

A. Obiectivele cercetării teoretice

1. Colectarea și valorificarea energetică a deșeurilor menajere din România și Uniunea Europeană;
2. Captarea și gestionarea într-o manieră ecologică a gazului de depozit produs în masa deșeurilor menajere depozitate în haldă;
3. Tehnologii de tratarea termică a deșeurilor menajere în incineratoare;
4. Metode de neutralizare și stabilizare a reziduurilor rezultate în urma incinerării deșeurilor;

B. Obiectivele cercetării aplicate și experimentale

1. Studii de caz pentru gestionarea gazului de depozit în condiții ecologice în pentru două depozite de deșeuri menajere din județul Cluj:
 - ✓ Depozitul pentru deșeuri menajere de la Pata Rât;
 - ✓ Depozitul pentru deșeuri menajere Dej.
2. Studii de caz pentru tratarea termică a deșeurilor în două stații de incinerare din Austria și România:
 - ✓ Incineratorul pentru deșeuri menajere din Arnoldstein din zona Carinthia – Austria,
 - ✓ Incineratorul pentru deșeuri menajere din Timișoara.
3. Evaluarea energetică a metodei de incinerare prin aplicarea tehnologiei cu îmbogățirea cantității de oxigen în aerul primar de ardere – studiu de caz incineratorul din Arnoldstein – Austria;
4. Studiul și analiza energetică a metodei de incinerare convențională (fără adaos de oxigen) – studiu de caz incineratorul din Timișoara;
5. Analiza chimică elementară și încadrarea în categoria de deșeuri pentru reziduurile provenite de la incinerarea de deșeurilor menajere;
6. Teste de stabilizare a reziduurilor provenite de la incinerarea deșeurilor municipale prin tehnologia șlamului dens;
7. Realizarea unui stand experimental la scară de laborator pentru efectuarea testelor de stabilizare a reziduurilor prin tehnologia șlamului dens;
8. Teste de levigare pentru roca obținută prin stabilizarea reziduurilor de incinerare în roca de cenușă obținută cu tehnologia șlamului dens.

1.5. Metoda de cercetare abordată și metodologia cercetării

Cercetarea s-a bazat pe valorificarea potențialului energetic al deșeurilor menajere generat de așezările urbane prin exploatarea puterii calorifice conținute în materia combustibilă conținute de acestea, privită ca o metodă sustenabilă și ecologică în ce privește neutralizarea, igienizarea și reducerea cantităților de depozitare în haldă a deșeurilor menajere. Abordarea pleacă de la faptul că deșeurile sunt încadrate în categoria resurselor energetice combustibile secundare, care pot fi exploatate într-un mod eficient printr-o tehnologie corespunzătoare.

Metoda de valorificare energetică abordată este similară cu cea aplicată în cazul valorificării energetice a cărbunelui inferior (lignit), puterea calorifică a deșeurilor menajere fiind foarte apropiată de cea a lignitului, având un trend de creștere în viitor. Ca resursă, creșterea cantităților de producere a deșeurilor menajere este ascendentă fiind legată de expansiunea zonelor urbane și creșterea consumului și a nivelului de viață. Metodele abordate țin cont de particularitățile

specifice fiecărei zone sau regiuni în parte, și au în prim plan atingerea unor obiective strategice cu impact pe termen scurt, mediu și lung în ce privește protecția mediului, eficacitatea și rentabilitatea economică.

Prin tema tratată în prezenta lucrare de cercetare, am abordat și aprofundat trei subiecte principale legate de valorificarea energetică a deșeurilor menajere:

1. Reducerea creșterii efectului de seră prin valorificarea energetică și/sau neutralizarea gazului de depozit generat în masa deșeurilor depozitate în haldă;
2. Producerea de energie termică și electrică prin exploatarea puterii calorifice ce caracterizează deșeurile menajere;
3. Tratarea și stabilizarea reziduurilor rezultate în urma procesului de incinerare a deșeurilor menajere.

Primul subiect tratează aspecte legate de reducerea efectului de seră prin eliminarea în atmosferă a gazului de depozit produs în urma biodegradării materiei organice conținută în masa deșeurilor menajere. Prin acest subiect am aprofundat două metode gestionare a cantității de gaz de depozit: metoda activă de captare și valorificare/neutralizare a gazului de depozit și metoda pasivă care asigură disiparea controlată a gazului produs în masa deșeurilor prin care se asigură stabilitatea și prelungirea duratei de viață a depozitului de deșeuri. Cele două metode le-am abordat prin studiu de caz pentru două depozite de deșeuri de la Pata Rât și respectiv Dej, ambele din județul Cluj.

Al doilea subiect tratează eficiența energetică a metodei de tratare termică a deșeurilor municipale, prin exploatarea lor sub aspectul unui combustibil. Prin acest subiect am aprofundat două metode de incinerare: cu adaos de oxigen în aerul necesar arderii respectiv metoda convențională fără adaos de oxigen. Tratarea celor două metode le-am abordat prin studiu de caz pentru incineratoarele din Arnoldstein – Austria respectiv Timișoara.

Scopul dezbaterii acestui subiect constă în evidențierea eficienței energetice, maximizarea arderii complete a pariculelor de deșeu incinerate și creșterea capacității de incinerare pentru unități de tratare termică a deșeurilor similare ca dimensiune proiectată.

Al treilea subiect tratează posibilitatea stabilizării reziduurilor provenite de la astfel de incineratoare prin experimente realizate pe stand, la scară de laborator, prin utilizarea cenușii de cărbune și a produselor de desulfurare aferente, ca material liant pentru stabilizarea poluanților în matricea rocii de cenușă formată prin tehnologia șlamului dens. În acest sens s-au efectuat patru rețete diferite de șlam, care au fost supuse testelor de levigare specifice pământurilor consolidate depozitate în haldă. Cenușa și produsele de desulfurare utilizate ca material liant au fost prelevate de la termocentrala CET Sud Timișoara, iar reziduurile aferente incinerării deșeurilor menajere au fost prelevate de la stațiile de tratare a deșeurilor menajere din Arnoldstein – Austria, Niklasdorf Styria – Austria și Glückstadt – Germania.

Scopul efectuării acestor experimente este de a determina cantitățile de poluanți conținuți în levigat. Fenomenul de levigare datorat apei meteorice (ploi, zăpadă) fiind mediul de transport al poluanților conținuți în materialul depozitat în haldă.

2. METODE DE VALORIFICARE A DEȘEURILOR MENAJERE

2.1. Caracterizarea energetică a deșeurilor menajere

Într-o economie modernă, deșeurile nu constituie doar reziduuri rezultate din activități antropice, ci sunt tratate ca surse reale de materii prime și energie. Este foarte importantă dezvoltarea unor strategii care se axează pe gestionarea judicioasă a deșeurilor având la bază raportările statistice în ce privește utilizarea integrală a resurselor și a direcționării acestora spre domenii care asigură valorificarea și eliminarea pierderilor de materiale și energie [1,56,60]. Deșeurile menajere generate de așezările urbane au o compoziție puternic eterogenă, fiind foarte greu de stabilit o generalizare a compoziției lor. Distincția pentru clasificarea și incadrarea lor în categoria deșeurilor periculoase sau nepericuloase se bazează în principal pe caracteristicile deșeurilor înainte de tratarea termică, și nu pe diferențele dintre emisii [55]. Astfel clasificarea lor se face pe baza elementelor poluante conținute în masa substanțelor ce compun deșeurile. Principalele categorii de deșeuri generate de așezările urbane, pretabile pentru incinerare pot fi clasificate astfel [1]:

- Deșeuri municipale neprocesate;
- Deșeuri municipale pre-tratate (combustibili derivați – RDF Refuse Derived Fuels);
- Deșeuri industriale nepericuloase și ambalaje;
- Deșeuri toxice;
- Nămoluri aferente stațiilor de tratare și epurare ape uzate;
- Deșeuri clinice/spitalicești.

Prezenta lucrare tratează exploatarea energetică a deșeurilor municipale neprocesate și deșeurile industriale asimilate ce nu conțin concentrații ridicate de poluanți. Deșeurile toxice și spitalicești sunt incinerate în unități speciale, modul și temperaturile de incinerare fiind la alți parametri comparativ cu tehnologiile de incinerare a deșeurilor menajere [1,8,55,56].

Cantitatea și calitatea deșeurilor menajere variază de la o zonă la alta și este influențată de un cumul de factori cum sunt [56]:

- Nivelul de industrializare și dezvoltare tehnică atins de zona urbană ce le generează, care influențează cantitatea și calitatea deșeurilor produse;
- Nivelul de trai și civilizația populației, cantitatea deșeurilor fiind direct proporțională cu acestea;
- Modul și metodele de ambalare a mărfurilor, acesta influențează creșterea calității deșeurilor prin aportul materiilor cu putere calorică ridicată;
- Călimatul preponderent al zonei geografice;
- Mișcarea sezonieră și ocazională a populației – turism;
- Naveta permanentă a populației între localități, care este generată de atracția localităților urbane mari asupra populației din împrejurimi.

E.V Peterson a formulat o ecuație de evaluarea a cantităților de deșeuri produse zonele urbane, ce ține cont de factorii de generare enumerați anterior precum și de eficacitatea măsurilor de control. Formula poate fi utilizată pentru determinarea unor valori de referință raportate la un an de bază [56]:

$$W_s = (1 + h \times t) \times [(1 - b) \times e^{gt} + b] \times e^{rt} \quad (2.1)$$

unde:

W_s – funcția ratei de producție a deșeurilor;

h – rata dezvoltării industriale, exprimată în funcție de productivitatea pe cap de locuitor în anul de bază;

b – producția de deșeuri pe cap de locuitor în anul de bază;

g – factori care exprimă eficiența măsurilor de control și limitare a poluării;

r – rata creșterii populației;

t – timpul în ani de la anul luat ca bază de calcul.

Determinarea cantității de deșeuri produse într-o zonă urbană raportată la o perioadă determinată de timp (de regulă 1 an) joacă un rol important în alegerea și dimensionarea unităților de tratare a acestora, și reflectă costurile financiare pe care comunitatea trebuie să le depună. Astfel, de la metoda menționată mai sus, are rolul de a preconiza trendul de evoluție în viitor al creșterii cantităților de deșeuri. În practica inginerescă, determinarea cantității totale de deșeuri se bazează pe rezultatul unor măsurători. Pentru estimarea cantității de deșeuri produsă de o anumită zonă urbană caracterizată de un anumit număr de locuitori se utilizează indicatorul de producere a deșeurilor [56]:

$$W_{s_{med.zi}} = q \times N \times 10^3 \quad [t/zi] \quad (2.2)$$

unde:

$W_{s_{med.zi}}$ – cantitatea medie de deșeuri menajere;

q – indicele mediu de producere a deșeurilor [kg/loc.zi];

N – numărul de locuitori luat în calcul [-].

Valoarea indicelui q variază între 0.5–1.5 [kg/loc.zi] funcție de gradul de dezvoltare socio-economic al zonei urbane luate în calcul. Astfel raportat la nivel european $q=0.9-1.4$ [kg/loc.zi], în cazul României fiind estimat la valoarea de $q=0.95$ [kg/loc.zi]. Conform datelor statistice centralizate de EUROSTAT, cantitățile de deșeuri produse în țările EU-27, raportate la numărul de locuitori ai fiecărui stat sunt:

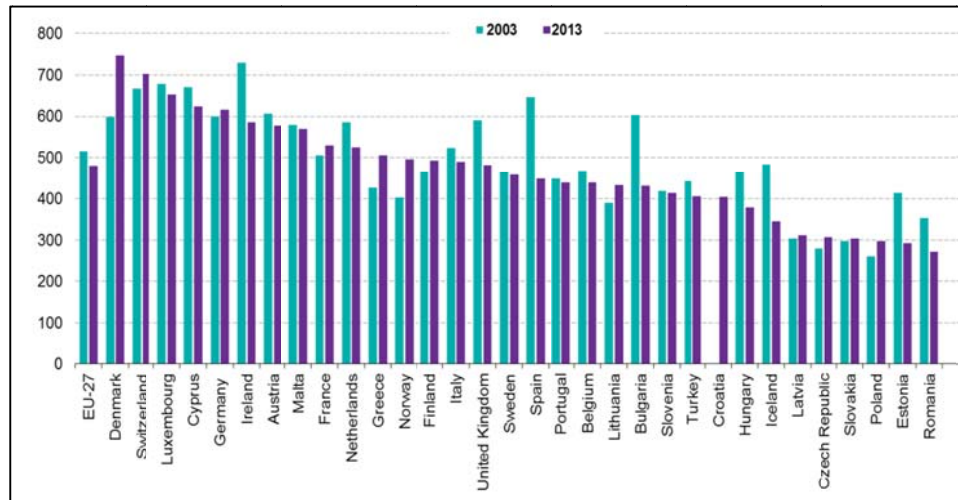


Figura 2.1 – Cantitățile de deșeuri municipale produse în EU-27 [61]

Datele prezentate în figura 2.1 reprezintă cantitățile de deșeuri produse pe cap de locuitor exprimate în kg/locuitor raportate la anii de referință 2003 și 2013.

Se observă că există un trend de scădere a producerii deșeurilor, și că generarea cantităților de deșeuri este influențată mai mult de nivelul de trai decât de nivelul de industrializare.

Principala caracteristică a deșeurilor menajere este reprezentată de eterogenitate, care variază într-un spectru larg de valori datorită factorilor multipli care caracterizează producerea lor. Totodată compoziția fizico-chimică a deșeurilor este variabilă în timp ceea ce conduce la stabilirea unor compoziții medii pe an, sezon, zonă urbană etc., mai ales când se urmărește valorificarea acestora. Sub aspectul valorificării energetice, caracteristicile de bază sunt reprezentate de conținutul de umiditate și puterea calorifică.

Umiditatea deșeurilor menajere reprezintă cantitatea de apă conținută în masa deșeurilor, având o influență puternică asupra puterii calorifice. Conținutul de umiditate este direct influențat de clima regiunii respective și de modul de colectare și stocare temporară a deșeurilor [1, 56, 60].

Determinarea umidității poate fi calculată utilizând următoarea formulă [56]:

$$W_t = W_r + \frac{W_h \times (100 - W_r)}{100} [\%] \quad (2.3)$$

unde:

W_t – umiditatea totală a deșeurilor menajere [%];

w_r – umiditatea de îmbibație a deșeurilor menajere [%];

w_h – umiditatea higroscopică a deșeurilor menajere [%].

Umiditatea de îmbibație reprezintă conținutul de apă care poate fi eliminat prin evaporare în aer liber la temperatura de 16–20°C și umiditatea relativă a aerului de 50%. Umiditatea higroscopică sau absolută reprezintă cantitatea de apă conținută în deșeuri care nu poate fi îndepărtată decât în condiții de laborator, prin uscare în etuvă la o temperatură de 105°C timp de menținere până la masă constantă. Umiditatea totală a deșeurilor variază între 25–60 %, în cazul țării noastre este cuprinsă între 49–52% față de 25–30% cât se înregistrează în țările europene cu un sistem de management integrat al deșeurilor avansat [56].

Puterea calorifică a deșeurilor reprezintă cantitatea de căldură degajată în urma arderii complete a deșeurilor brute (neprocesate) exprimată în kJ/kg sau kcal/kg. Similar cu orice alt combustibil, deșeurile menajere au o putere calorifică superioară (H_s) și o putere calorifică inferioară (H_i). Puterea calorifică superioară presupune că vaporii de apă conținuți în masa incinerată sunt condensați și restituie căldura consumată la evaporare. În procesele de incinerare reale, vaporii de apă formați sunt eliminați odată cu evacuarea la coș a gazelor de ardere. Astfel căldura consumată pentru evaporarea umidității se pierde la coș. Puterea calorifică inferioară ține cont de aceste pierderi de energie. Metodele cele mai folosite pentru determinarea unor valori medii cât mai aproape de realitate, sunt:

1.) Măsurarea directă a puterii calorifice

Determinarea puterii calorifice prin măsurarea directă constă în prelevarea unor loturi de probe din masa deșeurilor de 1 kg care se incinerează în bomba calorimetrică, prin care se obține puterea calorifică superioară (H_s). Pe baza acesteia se determină puterea calorifică inferioară astfel [56]:

$$H_i = [H_s - 6(W_t + 9H)] 4.18 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.4)$$

unde:

H_i – puterea calorifică inferioară [kJ/kg];

W_t – umiditatea totală [%];

H_s – puterea calorifică superioară [kJ/kg];

H – procentul masic în hidrogen al substanței incinerare [%];

26 Metode de valorificare a deșeurilor menajere – 2

Această metodă precisă de determinare a puterii calorifice inferioare are dezavantajul că se realizează pe eșantioane mici.

2.) Calculul puterii calorifice medii pe bază puterii calorifice a elementelor componente care formează masa deșeurilor

Această metodă se bazează pe media puterii calorifice inferioare a substanțelor ce compun masa deșeurilor menajere care aduc aport caloric. Astfel este necesară o analiză pentru compoziția masică a deșeurilor pentru a determina procente masice a substanțelor (materiei) componente. Cunoscând puterile calorifice inferioare pentru fiecare substanță în parte, se poate determina puterea calorică inferioară a deșeurilor astfel [56]:

$$H_i = \frac{1}{100} \times (p_1 \times h_1 + \dots + p_n \times h_n) - \frac{W_t}{100} \times 600 \times 4.18 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.5)$$

unde:

H_i – puterea calorică inferioară [kJ/kg];

p_{1-n} – procentul masic al substanței ce compune masa deșeurilor;

h_{1-n} – puterea calorică inferioară a substanței ce compune masa deșeurilor [kJ/kg];

Metoda ușor de utilizat dar prezintă dezavantajul aproximării mari datorită variației compoziției și a puterii calorifice inferioare.

3.) Metoda indirectă de determinare a puterii calorifice

Astfel de determinări se realizează în instalațiile de incinerare, pe baza căldurilor recuperate și a pierderilor din instalație. Se calculează după următoarea formulă:

$$H_i = (Q_r - Q_p) / G \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.6)$$

unde:

H_i – puterea calorică inferioară [kJ/kg];

Q_r – cantitatea de căldură recuperată [kJ];

Q_p – cantitatea de căldură pierdută în instalații [kJ/kg], și cuprinde căldura pierdută cu evacuarea gazelor de ardere, cu evacuarea zgurii și cenușii și cea pierdută prin înmagazinare în materiale care nu ard;

G – greutatea deșeurilor menajere incinerate în perioada de referință [kg].

4.) Metoda de determinare a puterii calorifice pe baza analizei elementare

Calculul puterii calorifice prin această metodă pleacă de la căldura degajată a prin reacțiile chimice de combustie (oxidare) a elementelor combustibile. În acest scop este necesară analiza imediată și analiza elementară care ne dă informații despre materialele principale care alcătuiesc masa deșeurilor:

Tabelul 2.1 – Analiza imediată a deșeurilor menajere [56]

Component	Umiditate [%]	Materii volatile [%]	Carbon fix [%]	Necombustibile [%]
Deșeuri organice	70	21.4	3.6	5
Hârtie	10.2	75.9	8.4	5.4
Carton	5.2	77.5	12.3	5
Plastic	0.2	95.8	2	2
Textile	10	66	17.5	6.5
Cauciuc	1.2	83.9	4.9	9.9
Piele	10	68.5	12.5	9
Lemn	20	68.1	12.5	9
Sticlă	2	-	-	96-99

Tabelul 2.2 – Analiza chimică elementară a deșeurilor menajere [56]

Component	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	Cl [%]	S [%]	Apă [%]	Cenușa [%]	Hi [kJ/kg]
Carton	36.79	5.08	35.41	0.11	0.12	0.23	20	2.26	26 000
Hârtie	32.93	4.64	32.85	0.11	0.13	0.21	16	13.13	22 850
Polietilenă	84.4	14.1	-	0.07	0.03	-	0.2	1.2	45 700
PVC	45	5.6	1.6	0.1	0.1	45.3	0.2	2.1	22 700
Polistiren	86.7	8.4	4	0.2	0.02	-	0.2	0.48	38 100
Poliuretan	63.1	8.3	17.6	6	0.02	2.4	0.2	4.38	26 000
Cauciuc	43.09	5.37	11.57	1.34	4.97	1.17	10	22.49	32 250
Lemn	41.20	5.03	34.55	0.24	0.09	0.07	16	2.82	29 000
Textile	37.23	5.02	27.11	3.11	0.27	0.28	25	1.98	27 600
Deșeuri de gradină	23.29	2.93	17.54	0.89	0.13	0.15	45	10.07	16 750
Elemente fine	15.03	1.91	12.15	0.5	0.36	0.11	25	44.9	10 850

Această metodă este specifică combustibililor fosili (cărbune, gaz natural, păcură) utilizați în industria energetică, dar poate fi aplicată și în cazul altor combustibili, dacă se determină analiza elementară a deșeurilor în cazul nostru. Compoziția chimică elementară a combustibililor poate fi exprimată astfel:

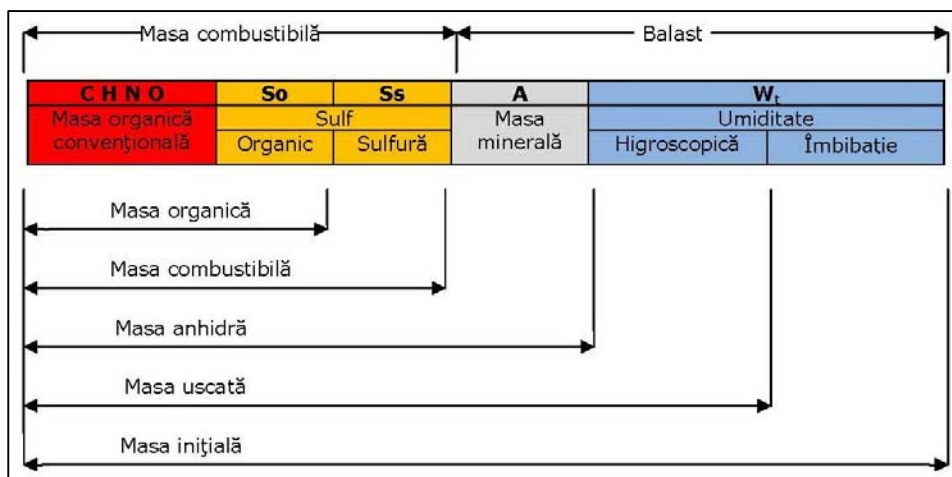


Figura 2.2 – Compoziția chimică elementară a elementelor combustibile [63]

Figura 2.2 împarte analiza elementară în parte combustibilă respectiv necombustibilă, informație utilă în estimarea cantităților de cenușă și zgură rezultate prin ardere. Pe baza acestor elemente se poate calcula puterea calorică inferioară a deșeurilor menajere cu una din următoarele formule:

$$H_i = 33.9c + 120.12 \left(h - \frac{1}{8}o \right) + 9.25s - 2.51h_2o \quad [\text{MJ/kg}] \quad [64] \quad (2.7)$$

$$H_i = 33.9c + 121.4 \left(h - \frac{1}{8} \times o \right) + 10.5s - 22.4h_2o \quad [\text{MJ/kg}] \quad [65] \quad (2.8)$$

$$H_i = 35c + 94.3h + 10.4s + 6.3n - 10.8o - 2.44h_2o \quad [\text{MJ/kg}] \quad [65] \quad (2.9)$$

$$H_i = 81c + 25s + 290\left(h - \frac{1}{8}o\right) - 6h_2o \quad [\text{kcal/kg}] \quad [66] \quad (2.10)$$

$$H_i = 2.336[145c + 610\left(h - \frac{1}{8}o\right) + 40s + 10n] \quad [\text{kJ/kg}] \quad [56] \quad (2.11)$$

unde:

c , h , n , o , s , n și h_2o – reprezintă procentul masic al elementelor chimice în compoziția deșeurilor menajere.

Diferențele între formulele de calcul sunt generate de principiile și modelul matematic, care caracterizează reacțiile chimice de ardere, ales pentru determinarea formulei de calcul. Deșeurile menajere din România au o putere calorifică inferioară cuprinsă între 2500 și 5000 kJ/kg [56].

2.2. Particularitățile valorificării energetice a deșeurilor menajere

Obiectivul sistemului de management integrat al deșeurilor menajere este de a gestiona deșeurile produse în societate într-un mod fezabil sub aspect al protecției mediului înconjurător și economic. Astfel este necesară înlănțuirea unor procedee pentru a ajunge la un rezultat compatibil cu destinația finală a deșeurii și cu complexitatea sa [1, 8, 56]. Procedeele de tratare, indiferent care, se compun din trei elemente principale: fluxul de materie valorificat, deșeurii ultim și refuzurile către mediul înconjurător. Sistemul de management integrat al deșeurilor poate fi reprezentat astfel:

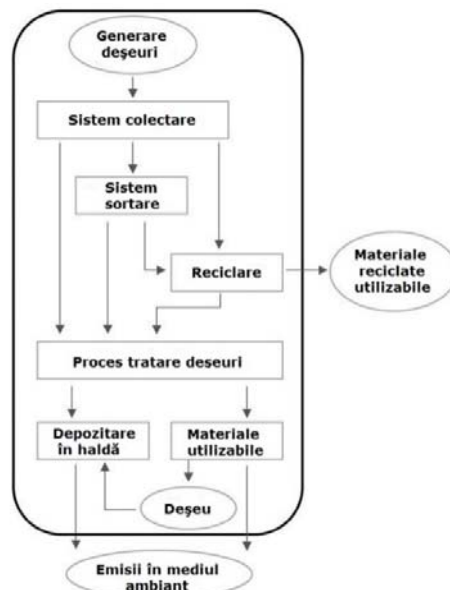


Figura 2.3 – Sistemul de management integrat al deșeurilor[8]

Figura 2.3 prezintă ordinea și interacțiunea procedeele care compun mecanismul managementului integrat al deșeurilor. Funcție de compatibilitatea fizico-chimică a deșeurii, acesta poate fi orientat în totalitate sau parțial către diferite destinații:

- Mediul înconjurător – deșeuri eco-compatibile, constituite din elemente neutre/inerte, ce nu influențează mediul;
- Valorificare – într-o unitate de tratare deșeuri, au în compoziția lor elemente contaminante (toxice) cu impact asupra mediului;
- Centru de depozitare controlată – deșeuri reactive.

Prin urmare procedeele de tratare vor avea ca obiective:

- Distrugerea părților contaminante (toxice);
- Transformarea părților contaminante în reactivi sau în elemente neutre;
- Extragerea părților contaminante în vederea stocării sau reutilizării acestora.

Fiecare procedeu de tratare al deșeurilor menajere se caracterizează prin capacitatea sa de a îndeplini unul din obiectivele enumerate mai sus, acestea având asociate funcții de transfer care ne permit realizarea unor bilanțuri materie-energie la nivelul fiecărui procedeu. Fiecare procedeu este supus la unele restricții referitoare la natura și compoziția deșeurilor pe care le pot trata [1, 56].

Indiferent de procedeu ales, tratarea deșeurilor constituie la rândul său un risc potențial de poluare la nivelul: apei, aerului, solului și a modului de producere a deșeurilor secundare. Un lucru este sigur și anume: oricare dintre procedee este ales acesta implică un impact mai redus asupra mediului decât lipsa oricărui tratament al deșeurilor [1,56].

În ce privește valorificarea energetică a deșeurilor menajere, care se poate aplica la scară industrială, fezabilă economic și care respectă normele de poluare admise în mediul ambiant, se poate pune în practică prin două procedee: tratare termică și captarea de biogaz. Ambele metode sunt dezvoltate sub conceptul "waste-to-energy" foarte intens dezbătut la nivel internațional.

2.2.1 Valorificarea energetică prin captarea biogazului

Metoda de captare a biogazului reprezintă o soluție de exploatare pe termen scurt, fiind legată de biodegradarea materiei organice depozitată în haldă (biomasă). Această metodă se pretează pentru gropile de gunoi existente, în care nu se mai depozitează deșeuri și sunt închise, dar poate fi aplicată și în cazul haldelor de depozitare controlată funcționale. În procesul de formare a biogazului se identifică cinci stadii de descompunere a substanței organice, care pot fi reprezentate grafic astfel:

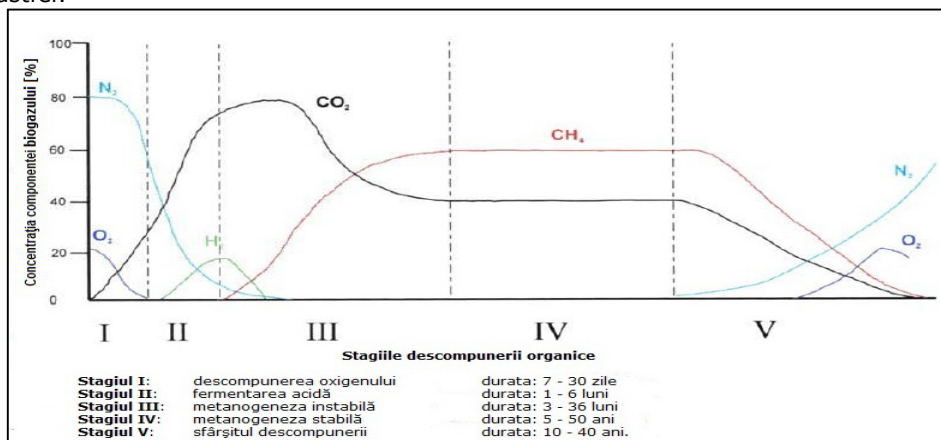


Figura 2.4 – Stagiile descompunerii organice a deșeurilor menajere[59]

Figura 2.4 prezintă durata descompunerii organice a fracției organice conținută în masa deșeurilor menajere. Din figură se observă că producția de gaz metan, începe din faza a doua, după un interval de 1-6 luni, funcție de condițiile existente. Își păstrează o valoare maximă constantă pe toată perioada fazei a patra după care intră în scădere în faza finală.

Metoda are la bază descompunerea aerobă și anaerobă a fracției organice conținută în deșeuri, proces care se desfășoară sub acțiunea bacteriilor metanogene. În urma acestui proces se obține un amestec de gaze care are următoarea componență volumică [56, 59, 62, 67]:

- CH₄ 40–55%
- CO₂ 35–45%
- O₂ 2–5%
- H₂S 10–550 ppm volum
- Diverse 1–3%

Amestecul de gaze format este cunoscut sub numele de biogaz de groapă de gunoi (LFG – Landfill Gas), și are un ciclu lung de formare. Producerea cantității de biogaz este influențată de mai mulți factori ce caracterizează depozitul de deșeuri, dintre care cei mai importanți sunt: compoziția deșeurilor (fracția biodegradabilă), gradul de compactare, vârsta deșeurilor, temperatură, conținutul de umiditate, clima specifică zonei de depozitare și modul de închidere al depozitului [59, 60, 62].

Pentru estimarea cantității de biogaz generată de un depozit pentru deșeuri menajere există mai multe modele matematice de calcul, două din cele mai utilizate fiind cel dezvoltat de U.S EPA – United States Environmental Protection Agency și IGNIG – Instytut Nafty I Gazu Polonia.

Modeul US EPA

Gradul de precizie al calculelor de estimare este puternic influențat de acuratețea datelor cunoscute despre depozitul de deșeuri. Acest model are la bază ecuația de gradul întâi ce caracterizează gradul de descompunere a fracției organice conținute în masa deșeurilor depozitate:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \quad [m^3/an] \quad [67] \quad (2.15)$$

unde:

Q_{CH_4} - cantitatea anuală de gaz metan [m^3/an];

$i = 1..n$ - anii de funcționare a depozitului [-];

$j = 0.1$ - increment de timp [-];

k - producția specifică de metan [an^{-1}];

L_0 - potențialul capacității de producție metan [$m^3/t_{deșeu}$];

M_i - masa deșeurilor depozitat în anul i [t];

t_{ij} - vârsta cantității de deșeuri j din masa depozitată M_i [an].

Producția specifică de gaz metan – k și potențialul capacității de producție a metanului L_0 au la bază datele statistice furnizate de CAA – Clean Air Act (calculate conform cerințelor NSPS – New Resource Performance Standards) și AP-42 – U.S EPA. Valorile acestor parametri sunt prezentate în tabelul de mai jos:

Tabelul 2.3 – Valorile parametrilor k și L_0 conform CAA și AP42 [67]

Parametru	$L_0[m^3/t]$	$k[an^{-1}]$	CH ₄ [%]
CAA – Clean Air Act	170	0.05	50
AP42 – U.S Environmental Protection Agency	100	0.04	50

Modelul de calcul US EPA poate fi utilizat cu succes în scopul determinării cantității totale de biogaz generat de haldele de depozitare a deșeurilor menajere. Este foarte des utilizat pentru dimensionarea sondelor de extracție a biogazului și a echipamentelor de exploatare și valorificare a acestuia.

Modelul IGNIG

Ca și în cazul precedent, gradul de precizie al calculelor depinde de acuratețea datelor cunoscute despre depozit. Acest model se bazează pe aceeași ecuație de descompunere descrisă în modelul anterior, cu particularitatea că acesta divizează masa organică a deșeurilor depozitate în patru categorii, fiecare categorie fiind caracterizată de propria durată de înjumătățire (de consum), astfel:

Tabelul 2.4 – Categoria masei organice și timpul de înjumătățire [59]

Categorie deșeu	Timp înjumătățire δ [an]
A – hârtie textile	10
B – deșeuri vegetale (parcuri, grădini)	6
C - alimente	3
D - masă lemnoasă	15

Conform acestui model de calcul pentru determinarea cantității de biogaz produsă de un depozit de deșeuri menajere, se utilizează următoarele ecuații:

- Cantitatea anuală de biogaz produsă, raportată la anul (x):

$$EmCH_4 = \sum EmCH_{4T,x}(A) + \sum EmCH_{4T,x}(B) + \sum EmCH_{4T,x}(C) + \sum EmCH_{4T,x}(D) \quad [m^3/t] \quad [59] \quad (2.16)$$

- Gradul de descompunere a deșeurilor:

$$MC_{T,x} = MSW \times MCF \times MASA \times udz(i) \times (1 - e^{-\lambda(i)(T-x)}) \quad [tone] \quad [59] \quad (2.17)$$

unde:

- i - categoria deșeurilor (A–D);
- udz(i) - fracția masică a categoriei raportată la masa totală depozitată anual;
- MASA - masa totală depozitată anual [tone];
- $\lambda(i)$ - coeficient care depinde de perioada de înjumătățire a fiecărei categorii de deșeu, calculată ca $\lambda(i) = 0.693148/\delta_{(i)}$;
- x - anul de referință pentru depozitare;
- T - anul de calcul considerat;
- MSW - fracția masică a deșeurilor solide depozitate [tone];
- MCF - factor de corecție pentru metan.

- Masa solidă descompusă pentru categoria i raportată la anul T:

$$MR_{T,x(i)} = MC_{T,x(i)} - MC_{T-1,x(i)} \quad [tone] \quad [59] \quad (2.18)$$

- Cantitatea de metan produsă în anul de calcul raportată la categoria (i), aferentă masei (MASA) depozitată în anul (x):

$$EmCH_4(i) = DOC \times F \times conv(i) \times MR_{t(i)} \quad [m^3CH_4] \quad [59] \quad (2.19)$$

unde:

- DOC - conținutul organic din masa deșeurilor;

F - fracția molară a metanului din cantitatea totală de gaz produs [mol/mol];
 conv(i) - descompunerea materiei organice funcție de categoria deșeurii.

Metoda este mult mai precisă decât cea anterioară, dar necesită date exacte despre cantitățile depozitate raportate la categoriile de încadrare A...D. Acest fapt poate fi cunoscut doar dacă partea care produce deșeurii are o evidență strictă a deșeurii produs, ceea ce în realitate este puțin probabil. Prin urmare metoda cea mai utilizată pentru estimarea cantității de gaz metan produsă de un depozit de deșeurii menajere rămâne cea simplificată după modelul US EPA.

2.2.2 Valorificarea energetică prin tratare termică

Metoda de tratare termică prin incinerare oferă o soluție de exploatare energetică de durată a deșeurilor, practic fiind legată de producerea directă a deșeurilor. Prin aplicarea acestei metode se urmăresc următoarele obiective [1,8]:

- Reducerea conținutului total de materie organică;
- Distrugerea poluanților organici;
- Concentrarea poluanților anorganici (metale grele);
- Reducerea volumului deșeurilor depozitate;
- Valorificarea potențialului energetic conținut în deșeu;
- Reducerea consumului de combustibili fosili.

Conform bilanțului energetic specific procesului de ardere a unui combustibil, în ipoteza unei arderi perfecte (teoretice) a combustibilului, cantitatea totală de căldură din produsele de ardere se calculează după relația:

$$Q_T = m_{\text{comb}} \times H_i + m_{\text{aer}} \times c_{pa} \times T_a \quad [\text{kJ}] \quad [63] \quad (2.20)$$

unde:

- Q_T - energia degajată prin ardere [kJ];
 m_{comb} - debitul masic de combustibil [kg/s];
 H_i - puterea calorifică inferioară a combustibilului [kJ/kg];
 m_{aer} - debitul masic de aer necesar arderii [kg/s];
 c_{pa} - căldura specifică izobarică a aerului necesar arderii [kJ/kg];
 T_a - temperatura aerului necesar arderii [K].

Energia calculată după această formulă necesită cunoașterea puterii calorifice inferioare a deșeurii, ceea ce necesită cunoașterea implicită a analizei elementare. Determinarea analizei elementare a deșeurii presupune prelevarea unui număr semnificativ de probe test, ceea ce nu este fezabil într-un concept de implementare la scară industrială.

Potrivit normelor europene în vigoare, metoda indicată pentru determinarea potențialului energetic conținut în deșeurii este determinarea puterii calorifice netă – NCV (Net Calorific Value) [15]. Această metodă este dezvoltată pe conceptul "Waste to Energy", având la bază testele de eficiență a incineratoarelor. Metodologia și principiile de calcul sunt detaliate în standardul european EN 12952-15 [15].

Principiul de bază al acestei metode constă în utilizarea bilanțului energetic al focarului (camera de combustie) și cel al generatorului de abur, fiind considerate împreună ca un calorimetru [15].

Determinarea valorii NCV se practică în efectuarea bilanțurilor energetice ale incineratoarelor pentru deșeurii existente, și poate fi calculată după următoarea formulă [1, 15]:

$$\text{NCV} = (1.133 \times (m_{\text{st w}}/m) \times c_{\text{st x}} + 0.008 \times T_b) / 1.085 \quad [\text{GJ/t}] \quad [1,15] \quad (2.21)$$

unde:

$$m_{st\ w} = m_{st\ x} - [m_f \times (c_f / c_{st\ x}) \times \eta_b] \quad [t/an]$$

$m_{st\ w}$ - cantitatea de abur produsă prin arderea deșeurilor, [t/an];

$m_{st\ x}$ - cantitatea totală de abur produsă într-o perioadă definită de timp, [t/an];

m_f - cantitatea de combustibil auxiliar utilizată în perioada de timp definită, [t/an];

m - cantitatea de deșeu incinerat în perioada de timp de referință, [t/an];

$c_{st\ x}$ - entalpia netă a aburului (entalpie abur minus entalpia apă alimentare), [GJ/t];

c_f - valoarea calorică netă a combustibilului auxiliar utilizat pentru producerea aburului, [GJ/t];

T_b - temperatura gazelor de ardere la ieșirea din generatorul de abur pentru un conținut de oxigen în gaze de 4-12%, [°C];

0.008 - conținutul specific de energie în gazele de ardere, [GJ/(t°C)];

1.133 și 1.085 - constante provenite din regresia ecuației de calcul, [-];

η_b - eficiența schimbului de căldură aferentă generatorului de abur (cca 0.80).

Formula de calcul poate fi aplicată doar în cazul incineratoarelor existente, deoarece necesită date prelevate din exploatarea incineratorului. Formula este valabilă doar în cazul conținutului de oxigen în gazele de ardere cuprins în intervalul de 4-12 %, coeficienții fiind calculați pentru o concentrație de 7-9% O₂ în gazele de ardere. Astfel acuratețea valorilor obținute prin utilizarea acestei metode are o eroare de ±5% NCV. Pentru un alt conținut de oxigen situat în afara intervalului 7-9% O₂ coeficienții T_b , 0.008, 1.1333 și 1.085 trebuie recalculați [1,15].

Valorificarea energetică a deșeurilor menajere prin tratare termică este cuantificată prin eficiența incineratorului, care reflectă performanța incineratorului de valorifica potentialul energetic conținut în deșeu. Eficiența incineratorului se calculează după următoarea formulă [1,15]:

$$Pl_{ef} = [Q_{exp} - (E_f + E_{imp})] / (E_f + E_{imp} + E_{circ}) \quad [1,15] \quad (2.22)$$

unde:

E_f - energia introdusă în proces prin arderea combustibilului auxiliar, pentru producerea aburului, [GJ/an];

E_{imp} - energia importată din afara sistemului, [GJ/an];

E_{circ} - energia circulantă anual (cantitatea produsă dar utilizată în proces), [GJ/an];

Q_{exp} - cantitatea anuală de energie exportată/vândută (energie termică și electrică), [GJ/an].

Eficiența incineratorului exprimată prin formula de mai sus, reprezintă un criteriu de performanță al exploatării energetice a deșeurilor menajere, bazată pe rezultate reale de exploatare. Calculul Pl_{ef} nu ține cont de valoarea NCV care reprezintă un parametru foarte important în bilanțurile energetice, astfel Pl_{ef} poate fi utilizat pentru compararea unor incineratoare care ard deșeuri cu puteri calorifice apropiate.

Indicatorul care reflectă eficiența energetică a unității de incinerare ce ține cont și de valoarea NCV cuantificată în prin bilanțul energetic este „R1”. Calculul eficienței energetice a incineratorului „R1” intră în obligația deținătorului unei astfel de unități, sub supravegherea personalului autorizat în acest scop.

Conform directivei europene WFD (Waste Framework directive) – Directive 2008/98/EC, calculul eficienței energetice „R1”, care se calculează după formula:

$$R1 = [E_p - (E_f + E_i)] / [0.97 \times (E_w + E_f)] \quad [1,15] \quad (2.23)$$

unde:

$$E_p = 2.6 \times (E_{e,imp} + Q_{e,exp}) + 1.1 \times (E_{hp,mp,imp} + Q_{h,exp}) \quad [GJ/an];$$

E_p - energia totală produsă anual,

$E_{e,imp}$ - energia electrică consumată în proces;

$Q_{e,exp}$ - energia electrică exportată (vândută);

$E_{hp,mp,imp}$ - energia termică consumată în proces,

$Q_{h,exp}$ - energia termică exportată (vândută);

E_f - energia introdusă în proces prin arderea combustibilului auxiliar, pentru producerea aburului, [GJ/an];

E_w - energia anuală conținută în masa deșeurilor incinerate, calculată prin determinarea NCV, [GJ/an];

E_i - energia importată anual (exclue E_w și E_f), [GJ/an];

0.97 - coeficient ce ține cont de pierderile de energie prin eliminarea zgurii și prin radiație în mediul ambiant.

Bilanțurile energetice care stau la baza determinării acestei formule pot fi reprezentate grafic astfel:

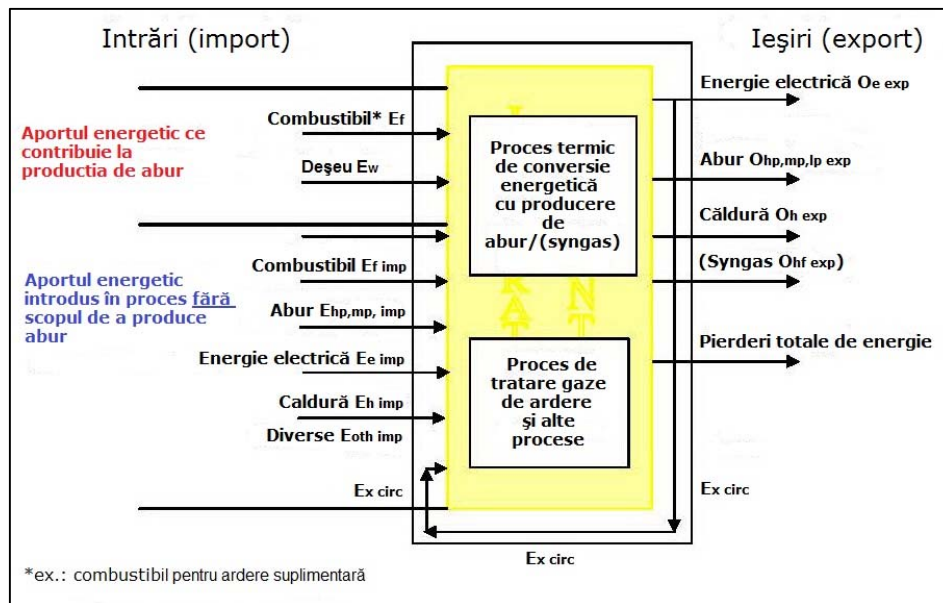


Figura 2.5 – Bilanțul energetic al incinerării deșeurilor menajere [1,15]

Figura 2.5 prezintă fluxurile de energie ce caracterizează procesul de tratare termică a deșeurilor menajere prin incinerare sau producere de combustibili derivați (syngas). Din figură se observă că incineratorul este privit ca un ansamblu întreg – „calorimetru”, fluxurile energetice fiind foarte clar stabilite, fiecărui flux energetic îi corespunde un proces specific aferent funcționării unei unități de valorificare energetică pentru deșeuri menajere.

2.3. Reziduurile aferente proceselor de valorificare energetică prin incinerare

În urma procesului de incinerare reziduurile rezultate sunt în formă solidă, lichidă și gazoasă. Cea mai reprezentativă cantitate este cea a reziduurilor solide, care reprezintă aproximativ 1/4 din masa umedă de deșeu incinerat.

Volumul total al reziduurilor rezultate sunt aproximativ 1/10 din volumul total al deșeurilor procesate [1,7,8,11]. Cantitățile și emisiile de poluanți conținuți în reziduurile generate de tratarea termică a deșeurilor menajere prin incinerare sunt influențate următorii factori:

- Compoziția și conținutul deșeurilor incinerate;
- Tehnologia și condițiile de operare specifice echipamentului de incinerare;
- Performanța și condițiile de operare specifice unității de tratare a gazelor de ardere.

Astfel fluxurile de reziduuri rezultate în urma procesului de incinerare pot fi grupate astfel [1,7,8,10,11]:

- Zgura – constituită din partea anorganică incombustibilă conținută în masa deșeurilor, precum și din particule combustibile oxidate incomplet (nearse). Acest reziduu se prezintă într-o formă vitroasă inertă, este colectat în partea inferioară a camerei de ardere, reprezentând 20-30% din masa umedă a cantității de deșeu incinerat;
- Cenușa de cazan – constituită din cenușa grosieră depusă în camera de ardere și în zonele de recuperare a căldurii din gazele de ardere (supraîncălzitoare de abur, preîncălzitoare de apă și economizor). Acest reziduu reprezintă maxim 10% din masa umedă a cantității de deșeu incinerat;
- Cenușa fină – constituită din particulele foarte fine de cenușă care sunt antrenate și transportate de gazele de ardere. În mod curent acestea sunt colectate și reținute în materialul absorbant utilizat de unitatea de tratare a gazelor de ardere (filtru cu saci). Cantitatea cenușii fine este cuprinsă între 1-3% din masa umedă a cantității de deșeu incinerat;
- Reziduu provenit de la stația de tratare a gazelor de ardere (reziduu APC) – constituit din material absorbant reacționat și ne-reacționat, folosit de unitatea de tratare a gazelor de ardere. Acest reziduu se prezintă sub formă solidă sau lichidă (șlam), funcție de procedeul de curățire a gazelor de ardere aplicat: uscat, semi-uscat sau umed. Acestea reprezintă o cantitate cuprinsă între 2-5% din masa umedă de deșeu incinerat.

În timpul proceselor de ardere au loc fenomene de volatilizare și ulterior condensare a poluanților conținuți în deșeuri, astfel reziduurile menționate mai sus concentrează și înglobează în masa lor (în structură) acești poluanți, reprezentați de metale grele, săruri și mocropoluanți organici (PAH–Polycyclic Aromatic Hydrocarbon și PCDD/F–Polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans) [1,8,11,12].

Raportat la masa deșeurilor incinerat cantitățile reziduuri solide provenite specifice unităților de incinerare a deșeurilor menajere sunt prezentate în tabelul 2.5.

Tabelul 2.5–Cantitățile specifice de reziduuri provenite din incinerarea deșeurilor [1]

Tip deșeu	Cantitate specifică (uscată) [kg/t _{deșeu}]
Zgură	200-350
Cenușă de cazan	20-40
Reziduu APC (doar material absorbant utilizat): - procedeu uscat - procedeu semi-uscat - procedeu umed	8-15 15-35 7-45
Produși de reacție și cenușă fină: - procedeu uscat - procedeu semi-uscat - procedeu umed	30-50 40-65 32-80
Conținutul de carbon activ	0.5-1
Notă: reziduurile provenite de la procedeul umed sunt pentru un conținut de substanță uscată de 40-50 %.	

Concentrațiile poluanților conținuți în aceste reziduuri sunt cuantificați prin indicatori specifici fiecărui poluant urmărit, cei mai monitorizați fiind: HCl (colhuri), HF (fluoruri), SO₂ (dioxid de sulf), NO_x (oxizi de azot), TOC (Total Organic Carbon – conținut total de carbon), PCDD/PDCF (dioxine/furani), PCBs (Poly-Chlorinated-Biphenyls), VOCs (compuși organici volatili) și metalele grele (Hg, Cd, Tl, Ab, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn). Cantitățile remanente în reziduuri depind de compoziția deșeurilor incinerat și de condițiile de operare.

Datorită faptului că aceste reziduuri nu pot fi utilizate în alte aplicații, cu excepția deșeurilor metalice reciclate, aceste sunt depozitate în haldă. Înainte de depozitarea lor în haldă, aceste reziduuri trebuie stabilizate/inertizate pe cât de mult este posibil. În cazul reziduurilor provenite de la incineratoarele pentru deșeuri municipale cea mai fezabilă metodă este cea de stabilizare/solidificare a materialului depozitat [1, 28,42, 44, 46, 47, 50, 51, 58, 60].

3. CAPTAREA BIOGAZULUI DIN DEPOZITELE DE DEȘEURI MENAJERE

3.1. Metoda activă și metoda pasivă de captare biogaz

Conform legislației în vigoare închiderea depozitelor pentru deșeuri municipale impune captarea și eliminarea sau valorificarea biogazului produs de aceste depozite [82,83]. Cantitatea și calitatea (conținutul în CH₄) de biogaz generată depinde de compoziția chimică (fracția biodegradabilă) a deșeurilor depozitate, în special a materiei organice, precum și de cantitatea (masă și volum) depozitată.

Generarea biogazului se datorează descompunerii materiei organice de către micro-organisme. Pentru obținerea unor cantități semnificative de biogaz, cu un conținut ridicat de metan (CH₄) se impune o fermentare anaerobă, iar cantitatea de metan produsă trebuie neutralizată/valorificată prin ardere, întrucât degajarea metanului în atmosferă duce la creșterea efectului de seră, și astfel contravine legislației în vigoare. La închiderea depozitelor de acest fel se va ține seamă de crearea condițiilor de fermentare anaerobă.

Factorii principali care stau la baza estimării cantității de biogaz de depozit produs sunt [83]:

- Suprafața și adâncimea depozitului;
- Tipul deșeurii și potențialul producerii gazului metan și a celorlalte gaze;
- Vârsta deșeurilor;
- Modul de închidere (acoperire) și prezența stalului (foliei) impermeabile;
- Existența unui sistem colectare și monitorizare a gazelor;
- Condițiile hidrologice din zona depozitului;
- Locația și numărul de clădiri adiacente (dacă există).

În funcție de cantitatea de biogaz produsă (estimată) de masa deșeurilor depozitate în haldă există două metode de captare a biogazului după cum urmează:

Degazare activă – degazarea realizată prin aspirarea gazului în urma generării unor presiuni negative (vid) scăzute în corpul depozitului. Sistemul de degazare activă cuprinde următoarele elemente obligatorii:

1. Puț/sondă forată de extracție biogaz,
2. Conducte de captare (cap sondă) biogaz,
3. Stație de colectare biogaz,
4. Conducte de transport și conductă principală de eliminare biogaz,
5. Separator condensat (levigat),
6. Instalație de ardere controlată a biogazului (facă) sau instalație pentru valorificarea biogazului (motoare biodiesel),
7. Componente de siguranță.

Degazare pasivă - degazarea se realizează după faza de degazare activă, sau pentru o cantitate de biogaz estimată sub 100 [m³/h], sau un conținut de metan

(CH_4) <20 % din volumul total de gaz generat de depozit (materie putrescibilă scăzută). Sistemul de degazare pasivă cuprinde doar sonda forată de extracție a biogazului, fiind mai simplificată sub aspect constructiv comparativ cu cea din metoda activă.

Metoda fezabilă pentru valorificarea biogazului generat de depozit este cea activă, deoarece conținutul de metan în cantitatea totală de biogaz produs asigură rentabilitatea economică. Metoda pasivă este utilizată pentru a disipa uniform și controlat biogazul produs în masa deșeurii depozitate. Aceasta are ca obiectiv eliminarea posibilelor acumulări de gaze în depozit, care pot genera instabilitatea depozitului sau pot crea acumulări sub formă de „pungi de gaze” în zonele adiacente depozitului prin migrarea gazelor ceea ce duc la apariția posibilelor alunecări de teren din zonă sau chiar la explozii [82,83].

În figura 3.1 este sintetizat modul de construcție și elementele componente specifice unei unități de valorificare energetică a biogazului (metoda activă) produs de depozitele pentru deșeuri menajere:

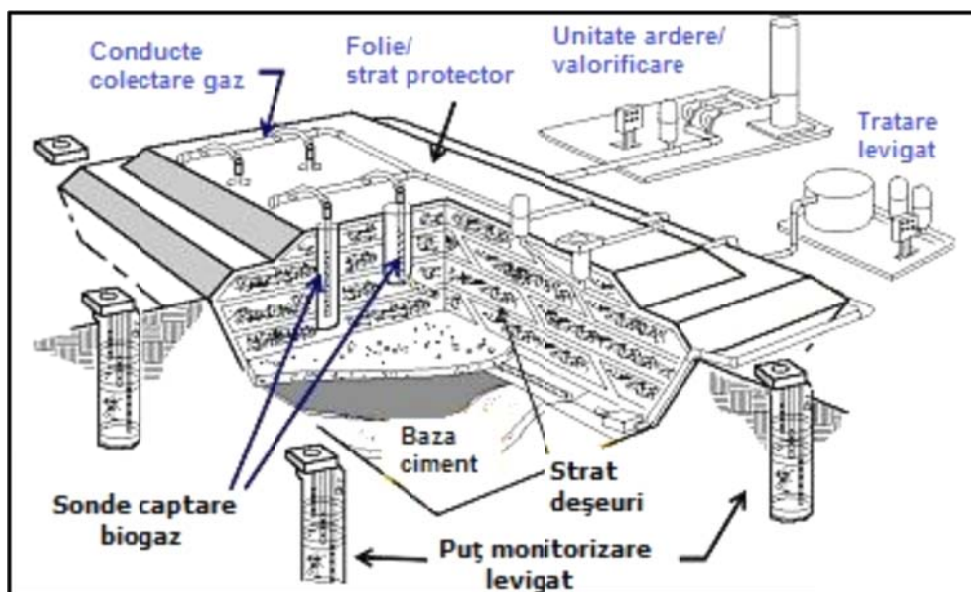


Figura 3.1–Concept captare valorificare/neutralizare biogaz de depozit [59]

Sub aspect constructiv, sondele de extracție biogaz, pot fi verticale (ca în fig.3.1) sau orizontale. Alegerea unui tip sau altul se face în funcție de grosimea stratului de deșeu depozitat în haldă și de tehnologia disponibilă de foraj. În mod curent se recomandă sonde verticale pentru straturi cu grosimea de 5-20 m, iar pentru straturi cu grosimi sub 5 m cele orizontale.

Sub aspect tehnologic, captarea biogazului prin metoda activă presupune acoperirea suprafeței întregi a depozitului cu un strat de folie geo-textilă impermeabilă, care să creeze condiții de fermentare anaerobă și să împiedice pătrunderea apei meteorice (ploi și zăpadă) în masa deșeurii. În altă ordine de idei, se creează un digester anaerob la scară mare. Folia este acoperită cu mai multe straturi de materiale protectoare (pietriș, pământ), specifice închiderii acestor tipuri

de depozite, în scopul încadrării în peisaj a depozitului prin stimularea dezvoltării unui strat de vegetație. În timpul exploatării biogazului se menține doar un strat de iarbă și arbuști cu rădăcini scurte pentru a nu perfora folia.

Sondele de captare a biogazului sunt asemănătoare cu cele practicate în captarea apelor subterane, doar că acestea au particularitatea că nu captează lichid ci gaz. Principiul de captare al unei astfel de sonde este sintetizat în figura de mai jos:

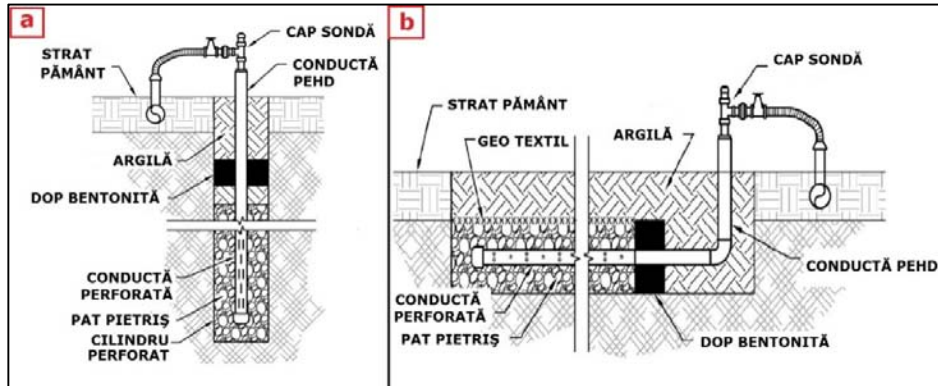


Figura 3.2 – Sondă captare biogaz depozit: a-verticală, b-orizontală [88].

După cum se observă din figura de mai sus, principiul constructiv și metoda de captare sunt asemănătoare, diferența între cele două tipuri de sonde constă în poziția de montaj. Principalul parametru de estimare a cantității de gaz de depozit captat cu o astfel de sondă îl constituie raza de influență a acesteia, care determină numărul de sonde necesar pentru captarea întregii cantități de biogaz estimată, precum și vidul necesar de realizat în scopul dimensionării instalației de absorție prin sistemul de conducte a biogazului. În figura 3.3 este sintetizată acțiunea razei de influență.

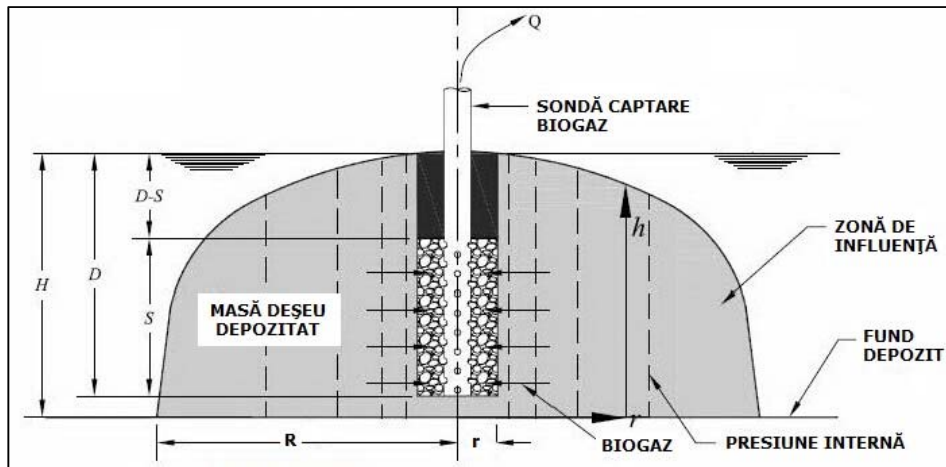


Figura 3.3 – Raza de influență a sondei de captare biogaz depozit [62]

După cum se observă în figura de mai sus, vidul necesar de realizat pe o sondă depinde de grosimea startului de deșeu, raza de influență și permeabilitatea stratului de deșeuri cuantificat prin densitatea acestuia. Pe baza acestor considerente vidul necesar de realizat pe o sondă se poate calcula după formula [62,84,87]:

$$\Delta p = \mu G_{\text{tot}} D \times \left[R^2 \times \ln(R/r) + (r^2/2) - (R^2/2) \right] / 2K_s \quad [62](3.1)$$

unde:

- Δp - căderea de presiune negativă (vid) pe sondă, [mbar];
- R - raza de influență a sondei, [m];
- r - raza sondei, [m];
- μ - viscozitatea absolută a gazului, [cP];
- K_s - permeabilitatea aparentă a deșeului, [cm²];
- D - densitatea deșeului, [kg/m³];
- G_{tot} - producția totală estimată de biogaz, [m³/an].

Estimarea cantității de biogaz produsă de un depozit pentru deșeuri menajere este descrisă amănunțit în capitolul 2.2.1. Sub aspect al valorificării prin ardere în motoare biodiesel, gazul brut colectat nu poate fi utilizat drept combustibil. Prin urmare este necesară o separare a gazului metan din amestecul de gaze captat (vezi cap. 2.2.1).

3.2. Metode de separare a metanului din biogazul de depozit

Biometanul reprezintă un amestec de gaze cu caracteristici asemănătoare cu cele ale gazului extras din zăcămintele naturale, care poate fi valorificat energetic prin utilizare ca și combustibil pentru motoarele biodiesel. Gazul de depozit, obținut din procesul de fermentare anaerobă, poate fi transformat în biometan printr-o curățire/filtrare prealabilă cu scopul de a elimina gazele auxiliare metanului, ca dioxidul de carbon (CO₂), amoniac (NH₃), hidrogen sulfurat (H₂S) etc. Gazul preponderent în compoziția amestecului de gaze de depozit îl reprezintă dioxidul de carbon (CO₂), care ajunge la aproape aceeași concentrație cu metanul (CH₄).

În acest scop, există mai multe procedee de obținere a biometanului, prin separarea dioxidului de carbon, cu aplicație la scară industrială [59]:

- Separarea prin adsorbție (PSA-Pressure Swing Adsorption) – utilizează un pat material adsorbant ce reține CO₂ în condiții de presiune ridicată, și care-l eliberează în condiții de presiune joasă. Asigură o puritate a biogazului mai mare de 96%vol.;
- Adsorbția fizică – presupune soluția CO₂ într-un solvent lichid. Asigură o puritate a biogazului mai mare de 96%vol.;
- Adsorbția chimică – presupune separarea CO₂ prin reacția chimică a cu monoethanolamine. Asigură o puritate a biogazului mai mare de 99%vol.;
- Separarea cu membrană - utilizează o membrană care separă metanul pe principiul permeabilității, CO₂ și H₂S având o permeabilitate mai mare decât cea a CH₄. Asigură o puritate a biogazului între 80–96%vol.;
- Separarea prin criogenie – procesul se bazează pe transformarea în fază lichidă a CO₂ în condiții de temperatură scăzută, iar CH₄ rămâne gazos. Asigură o puritate a biogazului mai mare de 99.9%vol.;

Procedeele de separare a metanului se diferențiază atât prin tehnologia utilizată cât și prin gradul de separare a gazelor auxiliare. Implementarea la scară industrială în scopul valorificării energetice a biometanului se face în funcție de rentabilitatea economică specifică fiecărui procedeu. Prin urmare, procedeele fezabile economic, utilizate la aplicațiile studiate în prezenta lucrare sunt procedeul de separare prin adsorbție (PSA) și ce de separare cu membrană.

3.2.1 Metoda de separare prin adsorbție - PSA

Metoda de separare prin adsorbția dioxidului de carbon (CO_2) din amestecul de gaz de depozit, este cea mai răspândită în aplicațiile de acest gen. Este o metodă viabilă, robustă, ușor de aplicat și are un cost redus de implementare și mentenanță.

Puritatea biometanului obținut mai mare de 96 % vol. fiind suficientă pentru utilizarea ca și combustibil pentru motarele biodiesel sau pentru turbine cu gaze. Valorificare în turbine cu gaze este mai rar întâlnită datorită costului ridicat de investiție al acestora. Schema de principiu care descrie funcționarea acestei metode este prezentată în figura 3.4:

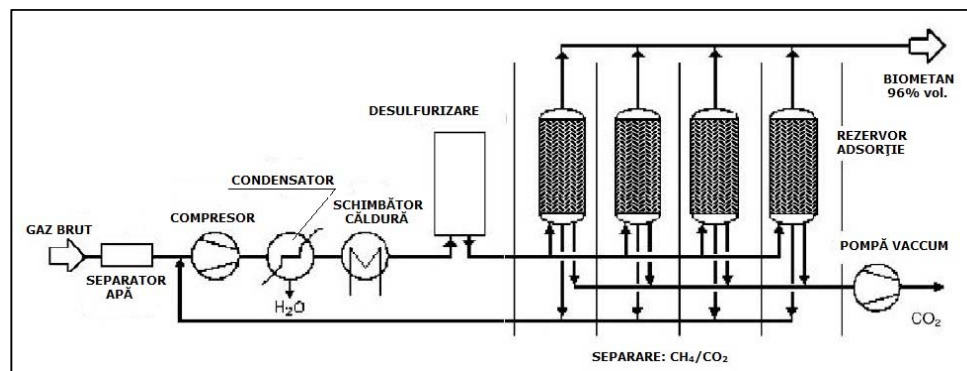


Figura 3.4 – Schema de principiu a metodei de separare CO_2 prin adsorbție PSA [59]

După cum se observă în figura de mai sus, tehnologia de adsorbție a CO_2 constă în utilizarea unor rezervoare umplute cu material adsorbant, care are proprietatea de a reține gazul de CO_2 în condiții de presiune ridicată. Materialul utilizat ca adsorbant este cărbune activ sau zeolit sub formă de granule fine, care au caracteristici de adsorbție selectivă la suprafața lor, pentru unele gaze ca CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O și H_2S [59,89]. Adsorbția se realizează secvențial, astfel este indicat folosirea unui număr de patru rezervoare cu scopul de a asigura un debit continuu. Funcționarea decurge în felul următor:

- Gazul de depozit este preluat de un compresor, care ridică presiunea gazului până la pragul necesar la care materialul adsorbant reține CO_2 .
- Înainte de a fi introdus în rezervoarele de separare, gazul comprimat este trecut printr-un condensator (răcitor) pentru eliminarea vaporilor de apă, după care este trecut printr-un schimbător de căldură care încălzește gazul, iar apoi printr-un scruber de desulfurizare.
- Amestecul de gaze purificat, intră presurizat în primul rezervor care se află în faza de adsorbție selectivă și reține CO_2 ;

- Al doilea rezervor se află în faza de depresurizare și elimină gazele reținute în materialul adsorbant,
- Al treilea rezervor se află în faza de eliminare biometan (CH_4), fiind la sfârșitul fazei de presurizare,
- Al patrulea rezervor intră în faza de pregătire pentru preluarea unei noi încărcături de gaze;
- Gazul rezidual este scos prin depresiunea creată de o pompa de vacuum conectată pe circuitul de evacuare a gazului rezidual.

Secvența de funcționare a acestui sistem are ca obiectiv realizarea unui flux continuu de biometan. Rezervoarele sunt interconectate între ele prin două circuite principale: unul de refulare biometan și celălalt de aspirație și eliminare gaz rezidual (CO_2). Separarea între aspirație și eliminare de pe circuitul secundar se face prin închiderea/deschiderea secvențială a unor vane cu solenoid acționate electric. Procesul se desfășoară pentru un interval de presiuni între 8-10 bar [59,89].

3.2.2 Metoda de separare prin membrană

Metoda de separare prin membrană a dioxidului de carbon (CO_2) din amestecul de gaze de depozit are la bază caracteristicile fizico-chimice și interacțiunea chimică dintre diferitele specii de gaze conținute în amestec și materialul membranei. Unele din speciile de gaze din amestec trec prin materialul membranei, iar altele nu, astfel se obține o separare a amestecului de gaze. Membranele se constituie dintr-un pat de material solid microporos utilizat pentru transportul unor specii de gaze într-un adsorbant lichid.

Astfel se disting două tipuri principale de separare cu membrană: uscată și umedă. Metoda cu membrană uscată atinge un grad de separare a metanului de 80%vol. și cea umedă de 96%vol. foarte des utilizată pentru valorificarea energetică în motoare cu biogaz. Schema de principiu pentru funcționarea unui sistem umed cu membrană este prezentată în figura 3.5.

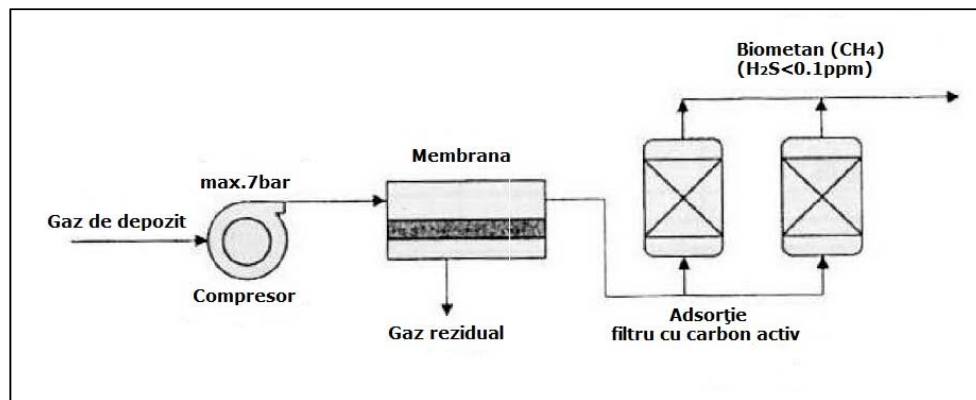


Figura 3.5 – Schema de principiu a metodei de separare CO_2 prin membrană [59]

Conform procesului reprezentat în figura 3.5, gazul de depozit este comprimat într-un compresor, după care este trecut printr-un separator cu membrană umedă. Separarea se produce în prezența unui lichid absorbant aflat în contact cu o

suprafață a membranei, care reține biometanul (CO_2), și trece cu lichidul absorbant în cealaltă cameră separată de membrană, de unde este eliminat.

Astfel în partea superioară a camerei de separare rămâne un gaz cu conținut ridicat de biometan (CH_4). Separarea are la bază solubilitatea dioxidului de carbon (CO_2) în lichidul absorbant, care este de 20 de ori mai mare decât cea a metanului (CH_4) datorită structurii moleculare diferite ale celor două gaze principale.

Gazul umed cu conținut ridicat de biometan este trecut mai departe printr-un filtru cu carbon activ care asigură curățirea biometanului până la un grad de peste 96% vol [69,89].

Ca lichid absorbant se utilizează cel mai frecvent monoethylamina, iar ca material de separare utilizat în realizare membranei de separație paladiu, polimer sau zeolit. Separarea prin membrană într-o singură treaptă nu oferă un grad ridicat de separare a CO_2 , astfel în mod frecvent se practică o separare în mai multe trepte.

3.3. Studiu de caz 1 – captarea biogazului de la depozitul pentru deșeuri menajere Pata Rât din județul Cluj

În anul 2014, în județul Cluj s-a demarat un proiect la nivel județean de închidere a depozitelor de deșeuri menajere neconforme. În acest sens, închiderea depozitelor neconforme de deșeuri trebuie realizată conform cerințelor și standardelor în vigoare implementate la nivel european și implicit național. Legislația în vigoare impune reducerea impactului negativ asupra mediului prin captarea și neutralizare/valorificarea cantității de biogaz produs de depozitele în cauză.

Depozitul de la Pata Rât este cel mai mare depozit de acest fel din județul Cluj, fiind „groapa de gunoi” a zonei metropolitane aferentă Municipiului Cluj Napoca. Datele de proiectare, necesare pentru efectuarea unui breviar de calcul pentru estimarea cantității de biogaz produs, și stabilirea posibilităților de neutralizare/valorificare a acestuia sunt [90]:

- An începere depozitare: 1974;
- An închidere depozit: 2010;
- Tip deșeuri depozitate: deșeuri menajere în amestec;
- Suprafața totală aferentă: 172635 m²;
- Volumul deșeurilor depozitat: 1350000 m³;
- Compoziția specifică a deșeurilor menajere depozitată % masice:
 - hârtie și carton: 15%;
 - sticlă: 4%;
 - metale: 5%
 - plastice: 14%;
 - lemn: 1%;
 - biodegradabile: 43%;
 - altele: 18%.

După cum am prezentat anterior (vezi cap. 2.2.1), pentru estimarea cantității de gaz de depozit există mai multe metode de calcul. În studiul de caz abordat am utilizat metoda US EPA care are la bază modelul matematic ce utilizează ecuația de graul întâi pentru descompunerea anaerobă (ecuația 2.15). Pentru efectuarea calculelor am utilizat un program de calcul specializat pentru astfel de aplicații „LandGEM – Landfill Gas Emissions Model v.3.02” dezvoltat de „Clean Air

44 Captarea biogazului din depozitele de deșeuri menajere - 3

Technology – CTAC” SUA și pus la dispoziție de U.S. Environmental Protection Agency – EPA [67].

Alegerea valorilor coeficienților (L_0 , k și CH_4 %), necesari pentru efectuarea calculelor de estimare a producției de gaz de depozit, este explicată în detaliu în capitolele anterioare (vezi cap. 2.2.1 – tabelul 2.3). În tabelul 3.1 sunt sintetizate datele rezultate în urma calculelor pentru estimarea cantității totale de gaz de depozit produsă de depozitul de la Pata Rât:

Tabelul 3.1 – Biogazul produs în depozitul Pata Rât

Depozitul pentru deșeuri menajere:	PATA RAT		
Calculat în anul de referință:	2014		
Gaz / Poluant	Debitul de emisii		
	(tone/an)	(m ³ /an)	(litri/min)
Cantitatea totală de gaz produsă	7526.120	6026567.534	11466.182
Biometan (CH ₄)	2010.307	3013283.767	5733.091
Dioxid de carbon (CO ₂)	5515.812	3013283.767	5733.091
NMOC (Non methane organic compound)	86.408	24106.270	45.865

Tabelul 3.1 reprezintă centralizarea datelor necesare în calculele de dimensionare pentru dimensionarea sistemului de colectare al gazului de depozit. Reprezentarea grafică a evoluției producerii de gaz de depozit eșalonată pe durata de viață activă, este sintetizată în figura 3.6:

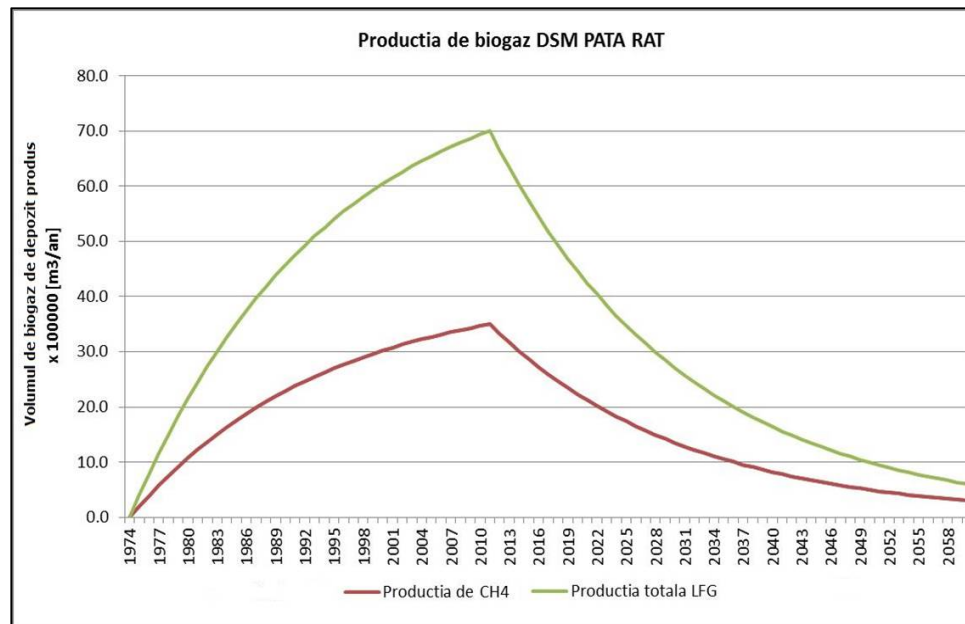


Figura 3.6 – Eșalonarea în timp a cantității de biogaz produsă în depozit

Parametrii de calcul utilizați în realizarea breviarului de calcul pentru dimensionarea sistemului de captare biogaz sunt:

- $H_{\min, \max}$ - înălțimea (grosimea) minimă/maximă utilă a depozitului, determinată pe baza planurilor de închidere și ridicări topografice;
- t_f - durata de funcționare a depozitului;
- S_D - suprafața totală aferentă depozitului;
- V_D - volumul total de deșeuri depozitat;
- R_s - raza de influență a sondei (impusă prin Ordin nr.757 din 26.11.2004);
- r - raza sondei (impusă prin Ordin nr.757 din 26.11.2004);
- D - densitatea medie a deșeurilor în depozit;
- K_s - permeabilitatea aparentă a deșeurilor depozitați;
- μ - viscozitatea absolută a gazului de depozit;
- t_x - grosimea stratului în care se imerzează sonda de extracție;
- A_x - numărul de sonde imersate la adâncimea „ t_x ”.

Formulele de calcul utilizate în realizarea breviarului de calcul pentru dimensionarea sistemului de captare biogaz sunt:

- $M_D = D \times V_D$ - masa deșeurilor depozitate în haldă,
- $RMA = M_D / t_f$ - rata medie de acceptare a deșeurilor în depozit;
- Q_{tot} - debitul specific de gaz de depozit produs în anul de referință;
- $G_{LFG} = Q_{\text{tot}} / M_D$ - producția specifică de gaz de depozit;
- $Q_{Ax} = 3.14 \times (R_s^2 - r^2) \times t_x \times D \times G_{LFG}$ - debitul de gaz de depozit captat de sonda „ x ” imersată la adâncimea „ t_x ” [62];
- $Q_{LFG} = \sum_1^x (A_x \times Q_{Ax})$ - capacitatea totală a sondelor de captare gaz de depozit

În urma calculelor rezultă o cantitate totală estimată de gaz de depozit produs de $Q_{\text{tot}} = 6.026.567 \text{ m}^3/\text{an} = 687.6 \text{ m}^3/\text{h} > 100 \text{ m}^3/\text{h}$, astfel conform normativelor în vigoare (Ordin nr.757 din 26.11.2004 [83]) cantitatea totală produsă este suficient de mare pentru a fi rentabilă o valorificare energetică a biometanului procesat din amestecul de gaze de depozit produs. În urma închiderii depozitului, conform sistemului de închidere, configurația finală a depozitului și distribuția sondelor de captare biogaz este prezentată în figura 3.7:

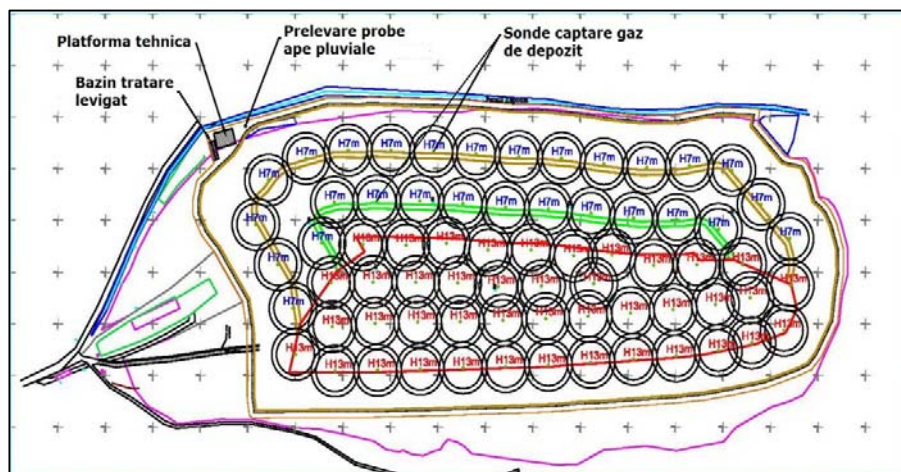


Figura 3.7 – Distribuția sondelor de captare biogaz la depozitul Pata Rât

46 Captarea biogazului din depozitele de deșeuri menajere - 3

Conform configurației depozitului prezentată în figura 3.7 rezultă posibilitatea de montaj a 28 de sonde la adâncimea de imersare de 7 m, și 42 sonde imersate la 13m, deșeu. Debitul maxim captat de o sondă funcție de adâncimea de imersare este:

- Pentru imersare la 7m:

$$Q_{A7} = 3.14 \times (R_s^2 - r^2) \times t_7 \times D \times G_{LFG} = 0.117 \text{ m}^3/\text{min} \quad (3.2)$$

- Pentru imersare la 13 m:

$$Q_{A13} = 3.14 \times (R_s^2 - r^2) \times t_{13} \times D \times G_{LFG} = 0.217 \text{ m}^3/\text{min} \quad (3.3)$$

unde:

$R_s = 25 \text{ m}$ - raza de influență a sondei [83];
 $r = 100 \text{ mm}$ - raza sondei de captare (a conductei perforate) [83];
 $t_7 = 7 \text{ m}$ - adâncimea de imersare a sondelor A7;
 $t_{13} = 13 \text{ m}$ - adâncimea de imersare a sondelor A13;
 $D = 650 \text{ kg/m}^3$ - densitatea medie a deșeului depozitat [62];
 $G_{LFG} = 1.88 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg zi}$ - producția specifică de gaz de depozit.

Conform documentației de specialitate pentru proiectarea sistemelor de captare biogaz de depozit, capacitatea totală de captare a biogazului raportată la numărul de sonde montate trebuie să fie cu cel puțin 5% mai mare decât debitul total estimat de gaz de depozit produs:

$$Q_{LFG} = 28 \times Q_{A7} + 42 \times Q_{A13} = 12.39 \text{ m}^3/\text{min} = 1.824 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{zi} \quad (3.4)$$

Conform calculelor prezentate explicit în Anexa 1 cantitatea totală estimată de gaz de depozit produsă este $Q_{\text{tot}} = 1.65 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{zi} < Q_{LFG}$, deci numărul de sonde montate este suficient.

Pentru dimensionarea pompelor de vid necesare extracției gazului de depozit este necesară determinarea pierderilor de presiune în sonde și în sistemul de colectare și transport gaz până la unitatea de ardere/valorificare gaz. Conform îndrumărilor de proiectare pentru dimensionarea gazodinamică a sistemelor de captare și transport gaz de depozit, calculul pierderilor de presiune se face pentru situația cea mai defavorabilă, adică trebuie identificat sonda cea mai îndepărtată față poziția de amplasare a pompelor de vid, precum și traseul de conducte de la sondă la pompele de vid.

Astfel sunt necesare efectuarea calculelor de pierdere de presiune pentru sonda cea mai îndepărtată și cele aferente traseului de conducte care colectează și transportă biogazul captat. Pierderea de presiune totală va fi suma celor două. Prin urmare pierderea de presiune pentru o sondă raportată la raza de influență se calculează astfel:

$$\Delta p = \mu G_{LFG} D \times \left[R^2 \times \ln(R/r) + (r^2/2) - (R^2/2) \right] / 2K_s = 1.818 \text{ mbar} \quad (3.5)$$

unde:

Δp - căderea de presiune negativă (vid) pe sondă, [mbar];
 $R = 25 \text{ m}$ - raza de influență a sondei;
 $r = 100 \text{ mm}$ - raza sondei;
 $\mu = 1.21 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ - viscozitatea absolută a gazului [62];
 $K_s = 15 \times 9.85 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ - permeabilitatea aparentă a deșeului [62];
 $D = 650 \text{ kg/m}^3$ - densitatea deșeului,
 $G_{LFG} = 1.88 \times 10^{-5} \text{ m}^3/(\text{kg zi})$ - producția totală estimată de biogaz.

Pentru determinarea pierderilor de presiune pentru sistemul de conducte de colectare și transport biogaz s-a folosit programul de calcul PSFF – Piping System Fluid Flow, pe baza cărurii s-a efectuat și echilibrarea sistemului de conducte prin stabilirea diametrelor de conductă necesare creării unui sistem cu pierderi minime de presiune. Conform rezultatelor obținute în urma calculelor valoarea pierderilor de presiune în sistemul de conducte până la sonda cea mai îndepărtată este:

$$\Delta p_c = 81.8 \text{ mbar} \quad (3.6)$$

Dat fiind faptul că din cantitatea totală de gaz de depozit produs doar 50 % reprezintă conținutul de metan care poate fi valorificat energetic, pentru situația prezentată în acest studiu de caz s-a optat pentru neutralizarea gazului de depozit printr-o instalație de ardere cu faclă, astfel se reduce efectul de seră generat de eliminarea directă în atmosferă și sunt îndeplinite condițiile de mediu impuse prin legislația în vigoare.

Descrierea tehnică a sistemului de captare, transport și neutralizare a gazului de depozit generat de depozitul pentru deșeuri menajere de la Pata Rât, conform calculelor de dimensiune prezentate anterior componența sistemului de tratare a gazului de depozit este:

- Sonde de captare gaz de depozit – 70 bucăți, din care 28 cu adâncimea de imersare 7 m și 42 la adâncimea 13 m;
- Sistem de conducte pentru colectarea și transportul gazului de depozit are o lungime totală echivalentă de 3567 m, din care 25 m conducte cu $D_{ext}=250\text{mm}$ – colector magistrale, 202 m conducte cu $D_{ext}=160\text{ mm}$ – magistrale și 3340 m conducte cu $D_{ext}=90\text{ mm}$ – conducte de transport;
- Unitate de extracție și ardere cu faclă biogaz – 2 bucăți.

Sistemul de captare biogaz de depozit – sondele de extracție

Captarea biogazului se va face prin metoda activă prin sonde de extracție verticale. Sondele vor avea un diametru de 80 cm și vor fi umplute cu material cu o permeabilitate de cel puțin $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ și o granulație de $d=16-32 \text{ mm}$ (pietriș sau piatră sfărâmată). În acest filtru, se imersează central conducta de drenare (conducta perforată) cu un diametru de 200 mm. Pereții conductelor de drenare vor fi perforați, iar diametrul găurilor va fi în concordanță cu granulația filtrelor de pietriș astfel diametrul găurii va fi mai mic de $0.5 \times d$, ceea ce înseamnă 8-12mm. Conductele cu perforația circulară sunt preferate datorită rezistenței mai mare de deformare și forfecare, precum și a stabilității crescute la încărcările rezultate din procesul de compactare a deșeurilor depozitate în haldă.

Sondele vor avea o adâncime maximă de imersare care va atinge 1.5-2 m deasupra stratului inferior de drenare de la baza depozitului. Pentru rezistență la coroziune este indicată utilizarea conductelor de PEHD (polietilenă de înaltă densitate). Pe timpul funcționării depozitului (de captare gaz), sondele de captare trebuie să fie etanșe, din acest motiv ultima porțiune a conductei verticale nu va avea găuri. Partea superioară a sondei va fi prevăzută cu un tronson flanșat prevăzut cu racord pentru robinet și racord flexibil pentru conexiunea la rețeaua de colectare și transport biogaz. Deasemenea tot aici va fi prevăzut și un racord cu capac ca punct de acces pentru prelevare probe și măsurători.

Ultima porțiune a sondelor, reprezentată de conducta de drenare, se va confecționa din țevă de PEHD cu diametrul de 255 mm astfel încât coloana

48 Captarea biogazului din depozitele de deșeuri menajere - 3

drenantă să pătrundă cca. 0.75 m în conducta neperforată. În figura 3.8 este prezentată schema constructivă a unei astfel de sonde:

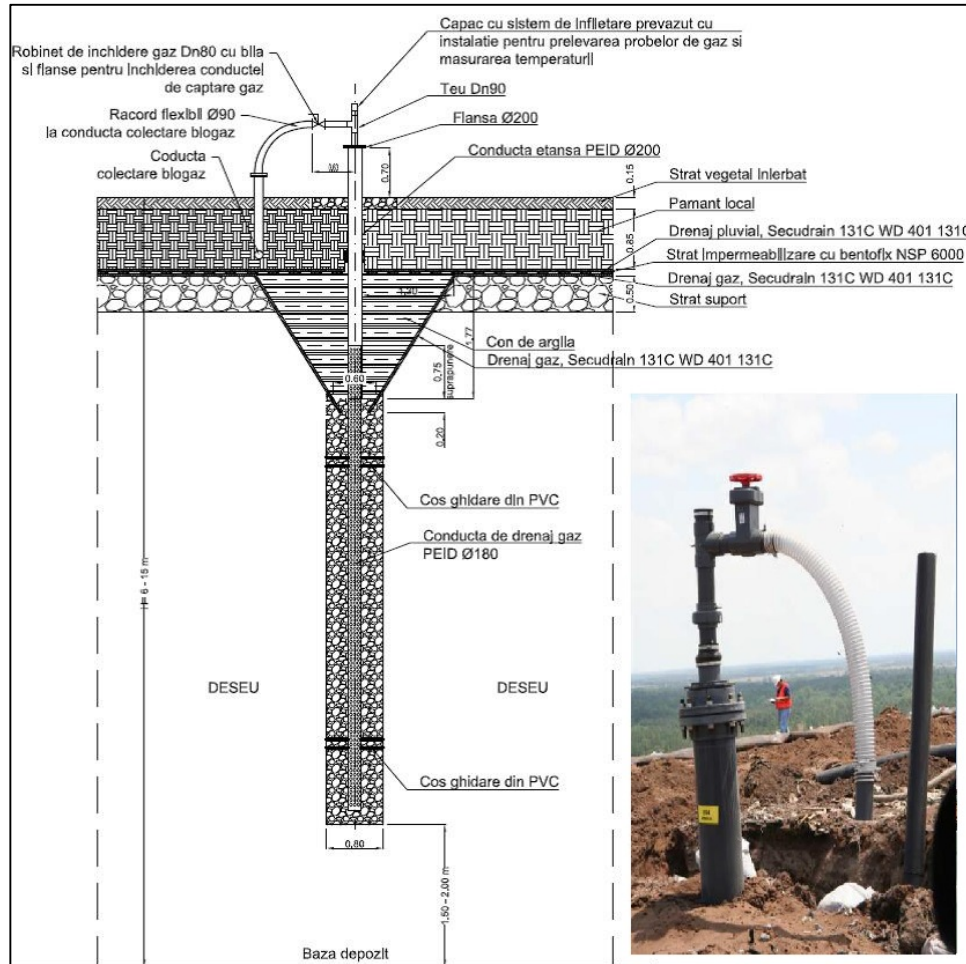


Figura 3.8 – Execuția și montajul sondei verticale active de captare biogaz

Sondele de captare vor fi amplasate cât mai aproape posibil de bermele de pietriș și de drumurile de acces, iar distanța de la puțuri la limita externă a corpului depozitului va fi de cel puțin 40m, astfel încât să fie acoperite, sub aspectul capării gazului, atât zonele de colectare cât și marginea depozitului. Sondele se amplasează pe cât posibil simetric și la distanță egală între ele, raza de influență recomandată fiind de 50m.

Prin această metodă se asigură o extracție uniformă în a gazului din interiorul masei deșeurilor depozitate în haldă. Pentru a acoperi un volum suficient al corpului depozitului și pentru a putea transporta gazul colectat în direcția dorită, este necesară crearea unui vid suficient pentru a acoperi pierderile de presiune generate de sonda de extracție și sistemul de colectare și transport gaz de depozit.

Sistemul de colectare și transport biogaz de depozit

Sistemul de colectare și transport biogaz se va confecționa din conducte PEHD PN10, pentru a asigura rezistența la coroziune și la acțiunea mecanică, cupozare subterană îngropată în stratul de protecție (pământ) cu care are loc ultima acoperire a depozitului. Sistemul de conducte este alcătuit din:

- Conducte de colectare și transport gaz cu diametru de 90mm – în aceste conducte se conectează racordul flexibil aferent sondei de extracție;
- Magistrale de transport cu diametru de 160 mm – în acestea se conectează conductele de captare și transport gaz de 90 mm;
- Colectorul de gaz principal cu diametru de 250 mm – care preia gazul de depozit din magistrale și alimentează unitatea de extracție și ardere.

Pentru curgerea și evacuarea condensatului conținut în gazul de depozit, se recomandă ca panta sistemului de conducte să fie min 0.5 %.

Unitatea de extracție și ardere cu facă

Numărul unităților de extracție și ardere a gazului de depozit se determină în funcție de dimensiunile depozitului (suprafață la bază construită), numărul sondelor de extracție și distribuția acestora pe suprafața depozitului. În cazul depozitului studiat sunt necesare două unități de ardere cu facă cu următoarele care să satisfacă următoarele condiții de procesare:

- Capacitatea de ardere gaz de depozit: $2 \times 400 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Asigurarea vidului necesar pentru extragerea și transportul gazului de depozit de minim: $\text{vid}_{\min} = -1.15 \times (1.8 + 81.8) \text{ mbar} = -96.14 \text{ mbar}$.

Sub aspect tehnologic, funcționarea unei unități de extracție și ardere gaz de depozit funcționează după schemă simplificată prezentată în figura 3.9:

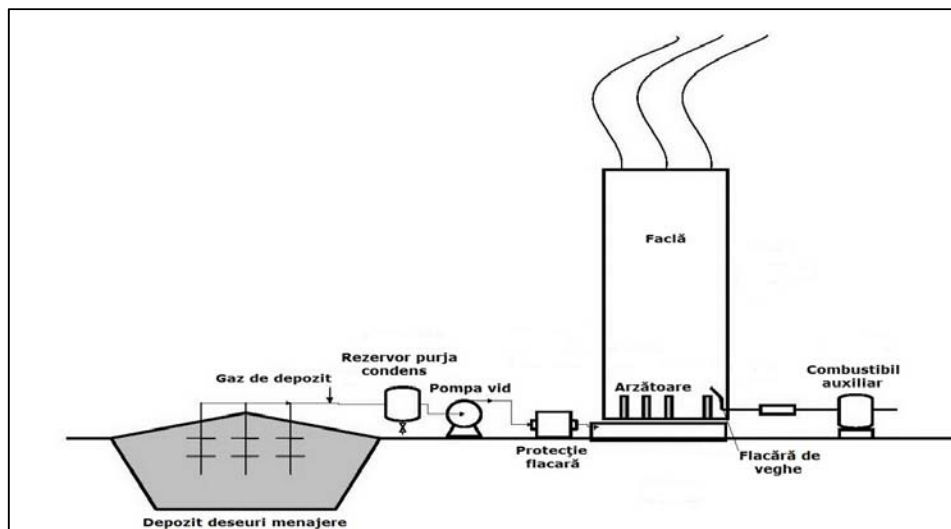


Figura 3.9 – Principiul de funcționare al unității de ardere gaz de depozit [62]

Conform figurii 3.9 unitatea de ardere a gazului de depozit va fi echipată cu:

- Separator de condens – echipament de colectare și separare a vaporilor de apă conținuți în gazul de depozit;
- Pompa vid cu motor rezistent la explozii;
- Faclă care să cuprindă incinerator cu combustie și camera de combustie;
- Sistem de monitorizare a presiunii și temperaturii,
- Analizor portabil pentru CH₄, O₂ și CO₂;
- Capacitatea de a funcționa la 1/5 din sarcina maximă de funcționare.

De asemenea, unitatea de extracție și ardere gaz de depozit trebuie să fie compactă și să fie prevăzută cu toate funcțiile de siguranță necesare unei manipulari și arderi în siguranță a gazului, conform cu prevederile din ghidul de referință SR-EN 60079 conform legislației în vigoare. Unitatea se va amplasa pe o platformă betonată situată la baza depozitului și să aibă un sistem de ardere cu faclă închisă, cu randament ridicat al combustiei care să asigure temperaturi de ardere de peste 1100°C pe o durată mai mare de 0.3 secunde, pentru asigurarea distrugerii gazelor auxiliare poluante conținute în amestec.

3.4. Studiu de caz 2– captarea biogazului de la depozitul pentru deșeuri menajere Dej din județul Cluj

Depozitul pentru deșeuri menajere de la Dej face parte din același proiect de închidere a depozitelor neconforme din județul Cluj ca cel din cazul de studiu precedent. Depozitul de deșeuri de la Dej este „groapa de gunoi” a orașului în cauză precum și a zonelor adiacente.

Datele de proiectare, necesare pentru efectuarea unui breviar de calcul pentru estimarea cantității de biogaz produs, și stabilirea posibilităților de neutralizare/valorificare a acestuia sunt [90]:

- An începere depozitare: 1977;
- An închidere depozit: 2012;
- Tip deșeuri depozitate: deșeuri menajere în amestec;
- Suprafața totală aferentă: 23100 m²;
- Volumul deșeurilor depozitat: 81500 m³;
- Compoziția specifică a deșeurilor menajere depozitate % masice:
 - hârtie și carton: 15%;
 - sticlă: 4%;
 - metale: 5%
 - plastice: 14%;
 - lemn: 1%;
 - biodegradabile: 43%;
 - altele: 18%.

După cum am prezentat anterior (vezi cap. 2.2.1), pentru estimarea cantității de gaz de depozit există mai multe metode de calcul. În studiul de caz abordat am utilizat metoda US EPA care are la bază modelul matematic ce utilizează ecuația de gradul întâi pentru descompunerea anaerobă (ecuația 2.15). Pentru efectuarea calculelor am utilizat un program de calcul specializat pentru astfel de aplicații „LandGEM – Landfill Gas Emissions Model v.3.02” dezvoltat de „Clean Air

3.4 - Studiul de caz 2 – Captarea biogazului din depozitul Dej 51

Technology –CTAC” SUA și pus la dispoziție de U.S. Environmental Protection Agency – EPA [67].

Alegerea valorilor coeficienților (L_0 , k și CH_4 %), necesari pentru efectuarea calculelor de estimare a producției de gaz de depozit, este explicată în detaliu în capitolele anterioare (vezi cap. 2.2.1 – tabelul 2.3). În tabelul 3.2 sunt sintetizate datele rezultate în urma calculelor pentru estimarea cantității totale de gaz de depozit produsă de depozitul de la Dej:

Tabelul 3.2 – Biogazul produs în depozitul de la Dej

Depozitul pentru deșeuri menajere:	DEJ		
Calculat în anul de referință:	2014		
Gaz / Poluant	Debitul de emisii		
	(tone/an)	(m ³ /an)	(litri/min)
Cantitatea totală de gaz produsă	511.546	409621.993	779.349
Biometan (CH ₄)	136.639	204810.997	389.675
Dioxid de carbon (CO ₂)	374.906	204810.997	389.765
NMOC (Non methane organic compound)	5.873	1638.488	3.117

Tabelul 3.2 reprezintă centralizarea datelor necesare în calculele de proiectare pentru dimensionarea sistemului de colectare al gazului de depozit. Reprezentarea grafică a evoluției producerii de gaz de depozit eșalonată pe durata de viață activă, este sintetizată în figura 3.10.

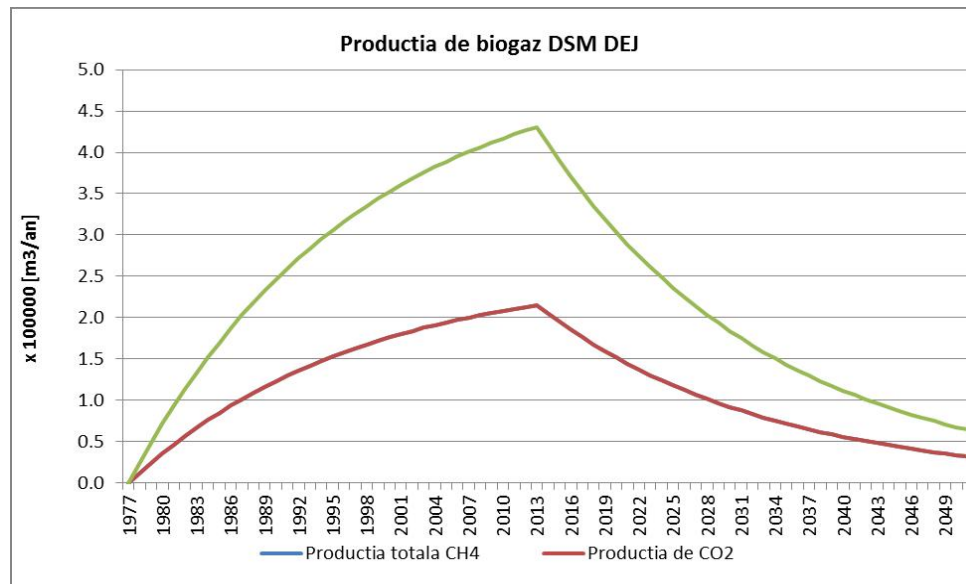


Figura 3.10 – Eșalonarea în timp a cantității de biogaz produsă în depozit

Parametrii de calcul utilizați în realizarea breviarului de calcul pentru dimensionarea sistemului de captare biogaz sunt:

52 Captarea biogazului din depozitele de deșeuri menajere - 3

- $H_{\min, \max}$ - înălțimea (grosimea) minimă/maximă utilă a depozitului, determinată pe baza planurilor de închidere și ridicări topografice;
- t_f - durata de funcționare a depozitului;
- S_D - suprafața totală aferentă depozitului;
- V_D - volumul total de deșeuri depozitat;
- R_s - raza de influență a sondei (impusă prin Ordin nr.757 din 26.11.2004);
- r - raza sondei (impusă prin Ordin nr.757 din 26.11.2004);
- D - densitatea medie a deșeului în depozit;
- K_s - permeabilitatea aparentă a deșeului depozitat;
- μ - viscozitatea absolută a gazului de depozit;
- t_x - grosimea stratului în care se imerzează sonda de extracție;
- A_x - numărul de sonde imersate la adâncimea „ t_x ”.

Formulele de calcul utilizate în realizarea breviarului de calcul pentru dimensionarea sistemului de captare biogaz sunt:

- $M_D = D \times V_D$ - masa deșeurilor depozitate în haldă,
- $RMA = M_D / t_f$ - rata medie de acceptare a deșeurilor în depozit;
- Q_{tot} - debitul specific de gaz de depozit produs în anul de referință;
- $G_{\text{LFG}} = Q_{\text{tot}} / M_D$ - producția specifică de gaz de depozit;

În urma calculelor rezultă o cantitate totală estimată de gaz de depozit produs de $Q_{\text{tot}} = 409622 \text{ m}^3/\text{an} = 46.727 \text{ m}^3/\text{h} < 100 \text{ m}^3/\text{h}$, astfel conform normativelor în vigoare (Ordin nr.757 din 26.11.2004 [83]) cantitatea totală produsă nu este suficient de mare pentru a fi rentabilă o valorificare energetică sau neutralizarea gazului de depozit produs.

Astfel în cazul acestui depozit se va face o captare a gazului de depozit prin metoda pasivă. Conform suprafeței de închidere, prezentată explicit în Anexa 2, rezultă că pentru degazarea depozitului sunt suficiente amplasarea a 6 sonde pasive, cu o adâncime de imersare 7.5 m. În figura 3.11 este prezentată schema constructivă a unei astfel de sonde:

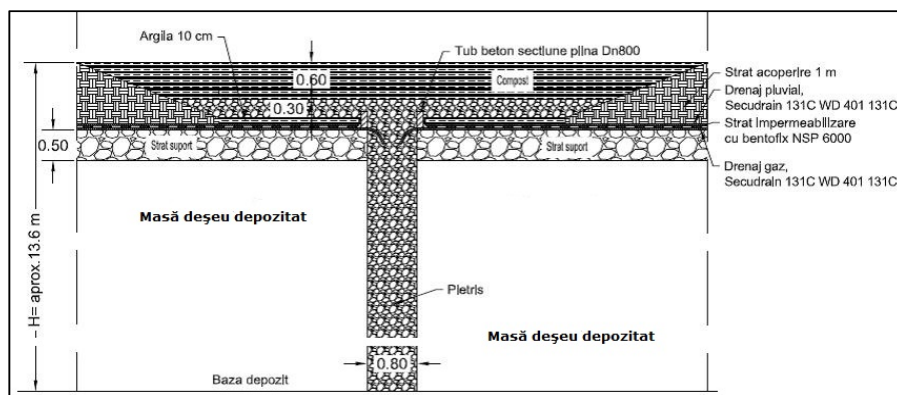


Figura 3.11 – Execuția și montajul sondei verticale pasive de captare biogaz

Sondele vor avea un diametru de 80 cm și vor fi umplute cu material cu o permeabilitate de cel puțin $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ și o granulație de $d=16-32 \text{ mm}$ (pietriș sau piatră sfărâmată). Partea superioară va fi concepută astfel încât să asigure dispersia biogazului colectat cât mai uniform în stratul de acoperire al depozitului.

4. TRATAREA TERMICĂ A DEȘEURILOR MENAJERE PRIN INCINERARE

4.1. Mecanismul procesului de incinerare a deșeurilor menajere

Procesul de tratare termică prin incinerare constituie o metodă de tratare pentru o gamă foarte largă de deșeuri. Incinerarea reprezintă procesul controlat al arderii prin care se reduce fracția combustibilă conținută în masa deșeurilor, datorată reacțiilor chimice de oxidare (combustie), astfel masa combustibilă este transformată în gaze, vapori de apă și particule solide vitroase necombustibile, care ulterior pot fi procesate/tratate sau depozitate în haldă în condiții ecologice.

Eficiența combustiei este guvernată de atingerea condițiilor necesare desfășurării reacțiilor chimice de oxidare, care sunt: timpul necesar oxidării complete, temperatura specifică de oxidare și turbulența care asigură arderea completă a particulei supusă reacțiilor de oxidare. Deasemenea trebuie să se asigure și cantitatea suficientă a oxigenului, care este cuantificată prin excesul coeficientului de aer necesar arderii „ λ ” (lambda).

Procesul de incinerare se desfășoară secvențial în două etape principale, astfel avem etapa primară, care este caracterizată de faza de uscare, volatilizare și combustia carbonului fix; și etapa secundară care este caracterizată de faza de combustie a gazelor și vaporilor rezultați din prima etapă [2, 24, 26]. Reacțiile chimice de combustie stau la baza efectuării bilanșurilor energetice pentru unitatea de incinerare, astfel caracteristicile cele mai importante care au efect asupra acestor reacții sunt puterea calorifică, conținutul de umiditate și masa inertă conținută în deșeuri.

Menținerea cantității scăzute de umiditate în masa deșeurilor duce la creșterea disponibilului de energie necesar în atingerea temperaturii până la punctul de distrugere a poluanților volatili și de ardere completă a gazelor, procese desfășurate în etapa secundară. Pentru o combustie eficientă este important ca vaporizarea conținutului de apă să se desfășoare în prima etapă în faza de uscare. Puterea calorifică asigură disponibilul de energie necesar atingerii parametrilor de combustie urmăriți, iar masa inertă cu cât este mai mică reduce cantitatea de energie pierdută odată cu evacuarea zgurii.

Conținutul de umiditate duce la scăderea puterii calorifice a deșeurilor datorită procesului de vaporizare care consumă energie. Astfel pentru vaporizarea apei este necesară o cantitate de căldură de 4184 kJ/kg, prin urmare 1 kg de deșeu menajer cu un conținut de umiditate 50%, consumă aproximativ 12% din valoarea puterii calorifice pentru uscare și alte 10% pentru vaporizarea apei la temperatura necesară condițiilor de ardere completă [2]. Astfel pentru o valorificare energetică eficientă a deșeurilor menajere, este indicată separarea deșeurilor cu conținut ridicat de umiditate, cum sunt resturile alimentare, încă din faza de colectare a deșeurilor. Acestea pot fi redirecționate pentru valorificarea energetică prin exploatarea potențialului de biogaz care pot să-l producă.

4.1.1 Etapa de combustie primară

Reacțiile chimice de combustie aferente etapei primare de incinerare a deșeurilor menajere se desfășoară în patru faze după cum urmează [2,63,66]:

a.) Faza I – uscarea

În această fază are loc încălzirea substanței heterogene conținută în masa deșeurilor, prin care se urmărește transformarea cantității de apă în vapori. Uscarea completă a deșeurilor se consideră finalizată în momentul când masa încălzită atinge temperatura de 167 °C [2]. Atingerea acestui prag de temperatură asigură eliminarea totală a conținutului de apă din masa deșeurilor, dat fiind faptul că au o compoziție puternic heterogenă. Atingerea acestui prag de temperatură se realizează prin utilizarea unui combustibil auxiliar (de obicei gaz metan sau păcură), necesar secvențelor de pornire/oprire specifice incineratoarelor de combustibili solizi.

b.) Faza II – volatilizare

În această fază are loc volatilizarea vaporilor și a gazelor formate în faza precedentă, fenomen care are loc datorită creșterii temperaturii prin aportul energetic dat de combustia combustibilului auxiliar utilizat. Vaporii și gazele difuzează (se împart în particule foarte fine) în momentul când ating temperatura de volatilizare specifică speței chimice din care fac parte și oxidează (se aprind) prin contact cu oxigenul provenit din faza precedentă.

Acest fenomen se desfășoară la suprafața stratului de deșeu, pentru substanțele cu prag de autoaprindere scăzut; și numai în condițiile în care cantitatea de oxigen din camera de combustie este suficientă. Astfel se explică faptul că flacăra se observă la o anumită distanță față de patul de deșeu incinerat. În caz contrar acești compuși reacționează între ei și crează noi hidrocarburi și/sau compuși parțial oxidați (ex. CO).

Gazele și vaporii cu prag de autoaprindere ridicat sunt antrenate în gazele de ardere și oxidează în faza următoare când se ating condițiile optime combustiei (temperatură și oxigen), specific zonelor cu temperatură ridicată a camerei de combustie. Pragul de temperatură la care se desfășoară această fază este cuprins între 278 – 723 °C, de obicei trebuie să se depășească pragul de autoaprindere a substanțelor în cauză cu câteva sute de grade.

c.) Faza III – arderea în masă

În această fază are loc arderea masei substanței solide rămasă după eliminarea vaporilor și a elementelor volatile conținute. Hidrocarburile și substanțele combustibile solide ating pragul temperaturii de autoaprindere prin creșterea aportului de energie degajat în urma reacțiilor de oxidare din faza precedentă. Arderea are loc în statul deșeurilor și se manifestă intens/violent. În realitate arderea este incompletă, datorită formării unei cruste vitroase în jurul particulei solide care împiedică pătrunderea oxigenului în „nucleul” particulei. În această fază are loc degajarea dioxidului de carbon (CO₂) și a vaporilor de apă, rezultați din oxidarea carbonului și respectiv a hidrogenului conținuți în substanțele care compun deșeurile.

d.) Faza IV – finalizarea arderii în masă

În această fază are loc finalizarea arderii masei substanței solide caracterizată de vitrificarea și consolidarea reziduurilor inerte prin răcirea datorată încetării reacțiilor chimice de oxidare care consumă elementele combustibile conținute în masa solidă. Este faza în care se formează zgura, constituită din metale și substanțe ceramice (aluminați, silice, calcar) la care se mai adaugă și cantități infime de alți oxizi. Zgura rezultată în urma acestui proces reprezintă un reziduu ultim, cu o compoziție

virtoasă, care de obicei nu reprezintă un pericol pentru mediul înconjurător, datorită fixării în masa lor a eventualelor substanțe poluante, fiind depozitată în haldă fără probleme.

Fazele specifice etapei de combustie primară sunt secvențiale dar nu separate complet una de alta, astfel trecerea de la o fază la alta este întrepătrunsă și există intervale de timp în care pot să existe în desfășurare simultant toate fazele acestei etape. Arderea completă cât mai eficientă necesită crearea unor condiții optime în camera de ardere care depind de cantitatea de oxigen disponibilă în aerul primar necesar arderii, gradul de dispersie și afânare al patului de deșeuri supus arderii.

În practică declanșarea reacțiilor chimice de oxidare se face prin utilizarea unui combustibil auxiliar, care are rolul de a ridica temperatura în camera de combustie până în momentul în care se aprinde o cantitate suficientă din masa combustibilă conținută în deșeu care degajă suficientă energie sub formă de căldură pentru atingerea parametrilor optimi de autoîntreținere a flăcării. După atingerea acestui prag utilizarea combustibilului auxiliar nu mai este necesară.

4.1.2 Etapa de combustie secundară

Etapa de combustie secundară corespunde distrugerii finale a gazelor și vaporilor greu combustibile rezultați din faza precedentă. Pentru atingerea acestui prag sunt necesare crearea unor condiții optime în ce privește temperatura ridicată, turbulența și necesarul excesului de aer (oxigen) care asigură distrugerea completă a fluxului de materie generat de faza anterioară. Etapa se desfășoară într-o singură fază în zona camerei de combustie cu temperatură înaltă.

Distrugerea completă a substanțelor cu prag ridicat de autoaprindere, a vaporilor cu conținut caloric scăzut precum și a particulelor solide fine greu combustibile antrenate în gazele de ardere necesită un timp de ardere mai lung și o turbulență mai puternică în comparație cu materia ușor combustibilă consumată în prima etapă.

Pentru atingerea acestui obiectiv, camera de combustie trebuie proiectată cu o geometrie specifică care să ofere suficient volum pentru atingerea zonelor de temperatură rezidentă înaltă. Prin menținerea zonei de temperatură înaltă și a concentrației optime de oxigen în limite optime, se asigură viteza de reacție suficientă de rapidă pentru distrugerea completă a substanțelor greu combustibile într-un timp foarte scurt. Astfel în cazul incineratoarelor pentru deșeuri municipale, trebuie să asigure menținerea fluxului de substanțe greu combustibile în zona de temperatură înaltă pentru un interval de 1 – 2.5 secunde, la o temperatură de 850 - 950°C [69]. Cantitatea de oxigen necesară reacțiilor de ardere în aceste zone este asigurată prin introducerea de aer secundar.

Introducerea aerului secundar s-a dovedit necesară menținerii unei presiuni parțiale a oxigenului, în zonele cu temperatură înaltă, care duce la creșterea eficienței de distrugere a poluanților conținuți în deșeurile incinerate [2, 69]. În instalații proiectate la scară industrială s-a dovedit practic, că prin crearea condițiilor sus menționate referitoare la zona de temperatură înaltă, pentru un timp de menținere de 2 secunde a substanțelor greu combustibile în această zonă, s-a atins un grad de distrugere a poluanților de 99.99% [2, 69, 70].

În figura 4.1 este reprezentată eficiența distrugerii poluanților din speța bifenil ((C₆H₅)₂) și clorobenzen (C₆H₅Cl) funcție de timpul de rezidență și temperatură:

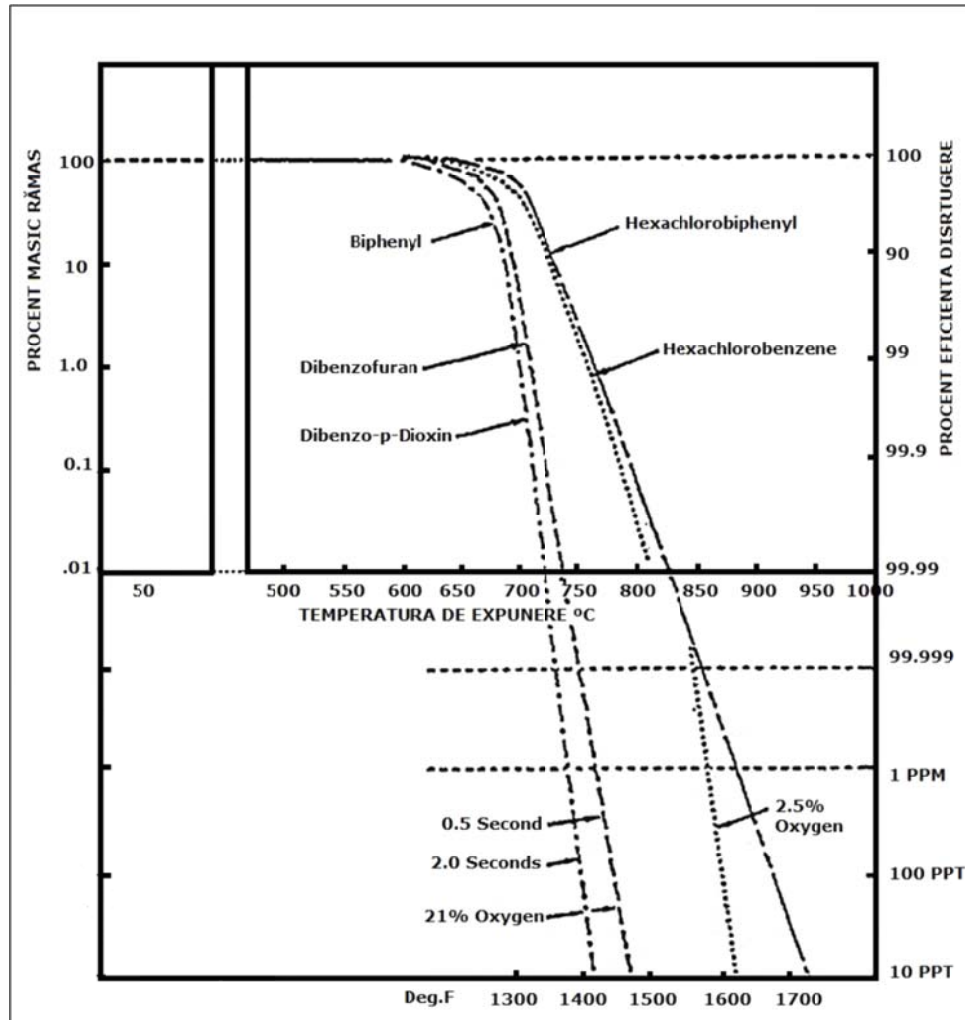


Figura 4.1 – Eficiența distrugerii poluanților funcție de condițiile de ardere [2]

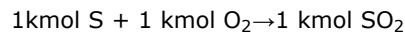
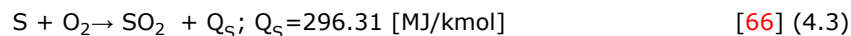
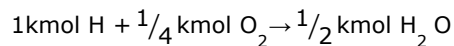
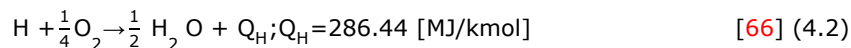
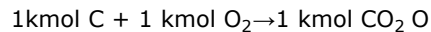
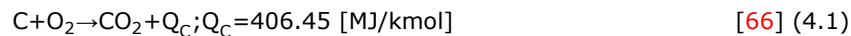
Din figura 4.1 se observă că distrugerea poluanților începe la pragul de temperatură de 600 °C, are o perioadă de scădere lentă pentru un timp de menținere sub o secundă, după care odată cu creșterea temperaturii și a timpului de menținere, scade brusc, asigurându-se astfel un procent de distrugere de 99.99%.

Distrugerea poluanților se finalizează puțin înaintea atingerii pragului de temperatură de 850°C. Prin urmare zona camerei de combustie, în care are loc etapa de ardere secundară, trebuie să fie proiectată astfel încât să asigure o distanță de parcurgere a gazelor de ardere suficientă, astfel încât timpul de parcurgere a gazelor de ardere măsurat din momentul intrării în zona cu temperatură 600°C, până în momentul ieșirii din zona cu temperatura de 850°C să fie de minimum două secunde.

Se poate concluziona că gradul de distrugere a poluanților este influențat de viteza de curgere a gazelor prin zona de ardere secundară. În cazul incineratoarelor pentru deșeuri menajere viteza de curgere a gazelor de ardere este controlată prin variația frecvenței de alimentare a ventilatorului situat după filtrul cu saci aferent stației de tratare a gazelor de ardere [68, 69].

4.1.3 Reacțiile chimice de combustie. Aerul necesar arderii.

Incinerarea reprezintă procesul chimic de oxidare prin care substanțele combustibile reacționează cu oxigenul și eliberează energie sub formă de căldură [2, 63, 66]. Combustia poate fi definită ca o reacție chimică rapidă a oxigenului cu elementele combustibile conținute într-un material combustibil [2]. Conform analizei elementare, specifică combustibililor solizi (vezi cap. 2.1 – fig.2.2) reacțiile chimice de oxidare exoterme sunt:



Cantitatea de oxigen necesară reacțiilor chimice de oxidare de mai sus se calculează după formula:

$$O_{\min} = \frac{MO_2}{MC} \times C + \frac{MO_2}{4MH} \times H + \frac{MO_2}{MS} \times S - O \text{ [kg}_{O_2}\text{/kg}_{\text{comb}}] \quad [66] \text{ (4.4)}$$

unde:

MO₂, MC, MH, MS – reprezintă masa molară a elementelor (vezi anexa 1) [71];

C, H, S, O – reprezintă procentul masic al elementelor conținut în substanță.

Cunoscând faptul ca aerul din mediul ambiant conține un procent volumic de 20.95% oxigen care masic reprezintă 23.20 %; cantitatea de aer teoretică necesară arderii este:

$$L_{\min} = O_{\min} / 0.232 \text{ [kmol}_{O_{aer2}}\text{/kg}_{\text{comb}}] \quad [66] \text{ (4.5)}$$

Cantitatea teoretică minimă de aer necesară arderii, exprimată volumic, poate fi calculată direct din compoziția chimică elementară după formula:

$$L_{\min} = 0.0895 \times C + 0.2685 \times H + 0.0335 \times S - 0.0335 \times O \text{ [m}^3\text{/kg}_{\text{comb}}] \quad [56] \text{ (4.6)}$$

unde:

C, H, S, O – reprezintă procentul masic al elementelor conținut în substanță.

Dat fiind faptul că deșeurile menajere au o compoziție heterogenă, iar determinarea compoziției elementare este foarte dificilă, cantitatea teoretică minimă de aer necesară arderii se poate calcula după formule aproximative care se bazează pe cunoașterea puterii calorifice inferioare „ H_i ” a combustibilului, după formula Rosin și Fehling astfel:

$$L_{\min} = (1.01 \times H_i / 4180) + 0.5 \text{ [m}_N^3/\text{kg}_{\text{comb}}] \quad [56] \text{ (4.7)}$$

Volumul de gaze rezultat în urma arderii teoretice se poate determina prin calcul tot pe baza puterii calorifice inferioare „ H_i ” după formula Rosin și Fehling astfel:

$$V_g = (0.89 \times H_i / 4180) + 1.65 \text{ [m}_N^3/\text{kg}_{\text{comb}}] \quad [56] \text{ (4.8)}$$

Reacțiile chimice de oxidare și cantitatea de aer minimă necesară arderii dau valori stoichiometrice, care sunt valabile în ipoteza unei arderi teoretice perfecte. În realitate reacțiile chimice de oxidare nu sunt perfecte, astfel procesul de ardere necesită o cantitate de oxigen mai mare decât cea teoretică calculată teoretic. Diferența între cantitatea reală de aer introdusă în procesul de ardere și cea teoretică calculată reprezintă excesul de aer „ λ ” (lambda). În cazul incinerării deșeurilor menajere coeficientul excesului de aer poate fi calculat astfel:

$$\lambda = (H_i - V_g \times c_{pg} \times t_g) / (V_a \times c_{pa} \times t_a) \text{ [-]} \quad [56] \text{ (4.9)}$$

unde:

- H_i - puterea calorifică inferioară a deșeurilor, [kJ/kg];
- V_g - volumul de gaze teoretic, [m³_N/kg];
- t_g - temperatura gazelor în camera de combustie (850-950°C), [°C];
- t_a - temperatura aerului introdus în camera de combustie, [°C];
- c_{pg} - căldura specifică la presiune constantă a gazelor la temperatura t , [kJ/m³_NK];
- c_{pa} - căldura specifică la presiune constantă a aerului la temperatura de introducere a aerului în camera de combustie, [kJ/Nm³K].

Astfel cantitatea reală necesară procesului de ardere va fi:

$$L = \lambda \times L_{\min} \text{ [m}_N^3/\text{kg}_{\text{comb}}] \quad [66] \text{ (4.10)}$$

După cum rezultă din etapele procesului de combustie, cantitatea reală de aer necesar arderii are un rol foarte important în controlul arderii prin asigurarea cantității suficiente de oxigen. În cazul incinerării deșeurilor menajere valoarea excesului de aer este cuprinsă în între 1.4–1.5 [2]. Dacă în procesul de ardere se utilizează un exces de aer mai mare decât este necesar, acest fapt conduce la scăderea temperaturii în focar care influențează eficiența dirstrugerii poluanților și recuperarea energiei din gazele de ardere.

Cantitatea totală reală necesară arderii se împarte în două fluxuri principale: aerul primar și secundar. Aerul primar necesar arderii este utilizat în prima etapă a procesului de incinerare și influențează evoluția celor patru faze de ardere, iar aerul secundar necesar arderii este injectat în zona de temperatură înaltă pentru a asigura cantitatea necesară de oxigen în această zonă.

Reglarea cantității de aer necesar arderii se face pe baza cantității de deșeu incinerat și a conținutului de umiditate al acestuia. Aceasta influențează direct

temperatura din camera de combustie. Variația temperaturii funcție temperatura calculată a flăcării, de excesul de aer stoichiometric ($\lambda=1$) și a conținutului de umiditate în deșeu, este prezentată în figura 4.2:

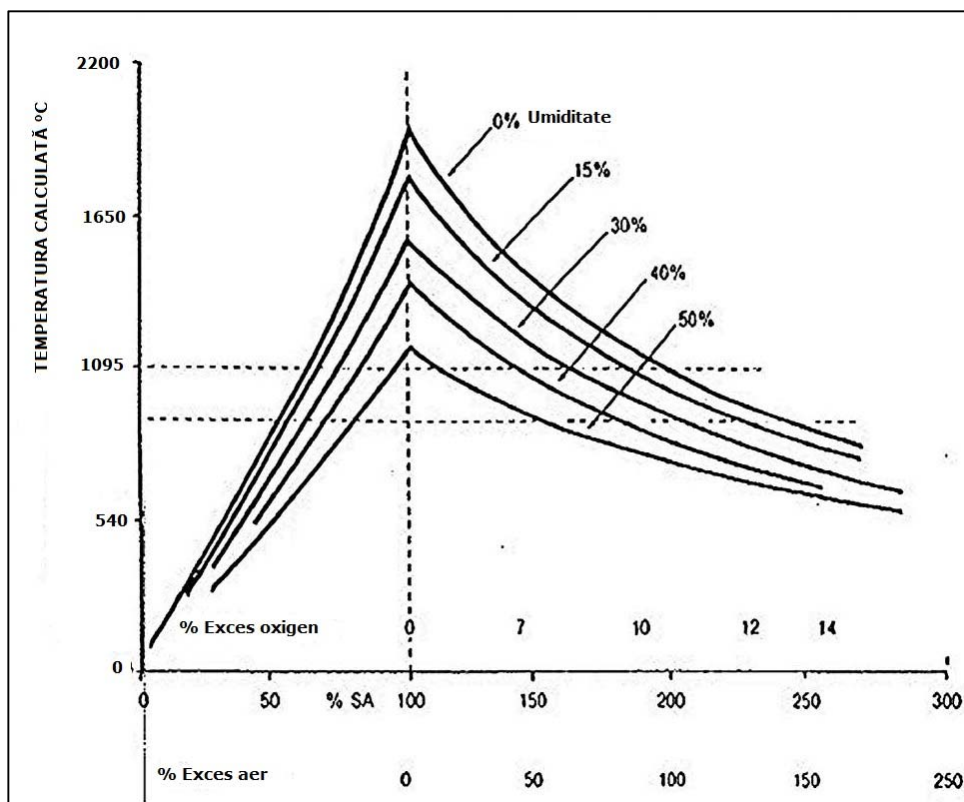


Figura 4.2 - Variația temperaturii funcție de excesul de aer [2]

Din figura 4.2 se observă că valoarea maximă a temperaturii de ardere se obține pentru valoarea stoichiometrică a excesului de aer $\lambda=1$ (100%), cu cât această valoare crește temperatură scade, astfel pentru $\lambda=1.5$ (150%) se pierde aproximativ 300 °C. Deasemenea se observă că umiditatea conținută în masa deșeurilor consumă o cantitate semnificativă de energie.

Influențele cantității de aer necesar arderii asupra etapelor de combustie desfășurate în procesul de incinerare al deșeurilor menajere sunt [2]:

a.) *Aer etapa 1- faza I - uscarea*

Această fază este caracterizată de eliminarea conținutului de apă din masa deșeurii incinerat, astfel nu se produce energie, dar produce vapori de apă și exces de aer, care influențează procesul de ardere. În cazul incineratoarelor pentru deșeurii menajere, care 90 % au un grătar mobil de ardere, aerul primar este injectat de jos în sus, prin patul de deșeurii. Injecția de aer trebuie controlată astfel încât să se introducă o cantitate strict necesară uscării masei de deșeu, aceasta fiind coroborată cu conținutul de umiditate al acestora.

b.) Aer etapa 1- faza II – volatilizarea

Această fază este caracterizată de volatilizarea compușilor chimici din masa deșeurilor. Temperatura aerului primar și debitul acestuia influențează direct producerea acestui fenomen. În funcționarea normală a unei unități de incinerare, aerul primar este preîncălzit în zona de recuperare a căldurii din drumul gazelor de ardere (zona preîncălzitoarelor de aer), astfel la momentul introducerii în camera de combustie are o temperatură cuprinsă între 140–180°C.

Pentru o funcționare cu $\lambda=0.5-0.9$, cantitatea de aer ce trece prin masa deșeurilor este mică, generând o agitație scăzută a particulelor din patul de deșeuri, iar cantitatea volatilizată este mică.

Oxidarea volatilelor specifică acestei faze, va fi incompletă ceea ce duce la creșterea cantității substanțelor combustibile care ajung în etapa II de ardere. Temperatura scăzută și volumul mare de elemente nense care ajung în etapa II conduc la utilizarea combustibilului auxiliar, pentru a asigura energia necesară atingerii autoaprindere și menținerea temperaturii în intervalul de distrugere a poluanților.

Practica a demonstrat că în cazul incinerării deșeurilor menajere, pentru valoarea excesului de aer situată în intervalul $\lambda=1.4-1.5$ se obține un echilibru optim al procesului de ardere, care asigură atingerea obiectivelor urmărite pentru tratarea deșeurilor menajere. Astfel în momentul atingerii parametrilor de funcționare normală nu mai este necesară utilizarea combustibililor auxiliari.

c.) Aer etapa 1- faza III – arderea în masă

Această fază este caracterizată de arderea violentă produsă în masa deșeurii, și produce zona fierbinte din patul deșeurii incinerat. În această fază cantitatea de aer trebuie injectată astfel încât să asigure doar oxigenul necesar arderii cât mai complete a fracției combustibile solide. Dacă cantitatea de aer nu este suficientă arderea va fi incompletă, ceea ce duce la scăderea eficienței valorificării energetice, și va consuma oxigenul din faza următoare. Excesul de aer în această fază duce la creșterea temperaturii care implică creșterea cantității de NO_x produs și a cenușii zburătoare antrenate în gazele de ardere.

d.) Etapa 1- faza IV – finalizare arderii în masă

Această fază este caracterizată formarea zgurii, și necesită o cantitate relativ redusă de aer care să asigure oxigenul necesar finalizării arderii hidrocarburilor conținute în deșeuri. Totodată aerul asigură răcirea zgurii și formarea crustei vitroase precum și o recuperare mică din căldura pierdută prin eliminarea zgurii. Aportul insuficient de aer în această fază duce la arderea incompletă a hidrocarburilor, astfel zgura va conține cantități de carbon organic (TOC) peste limitele admise, prin urmare nu se realizează reducerea volumică maximă a deșeurii incinerat. Excesul de aer în această fază asigură distrugerea totală a carbonului, dar va dezechilibra bilanțul excesului de aer necesar arderii.

e.) Aer etapa 2- distrugerea finală a substanțelor greu combustibile și a poluanților

Cantitatea de aer introdusă în această etapă este reprezentată de aerul secundar de ardere, și are rolul de a asigura aportul de oxigen necesar atingerii temperaturii de distrugere a poluanților conținuți în substanțele greu combustibile. Controlul cantității de aer introdus se face pe baza menținerii intervalului de temperatură optim specific zonei de temperatură ridicată din camera de combustie. Controlul echilibrului stoichiometric al arderii, al temperaturii și al timpului de rezidență al

gazelor de ardere în zona combustiei secundare au demonstrat că sunt principalele modalități de menținere în limitele admise a emisiilor [2].

În cazul incineratoarelor pentru deșeuri menajere, controlul și distribuția aerului necesar arderii se face în mai multe zone prin lance de injecție separată. Astfel este posibil dozarea controlată a aerului specifică fiecărui stagi/fază aferentă procesului de incinerare.

Pentru unitățile de incinerare moderne „state of the art” se utilizează conceptul de „oxigen boosting”, prin care se ridică concentrația oxigenului în aerul primar de ardere la 28–30 %. Insuflarea aerului cu oxigen îmbunătățit se practică doar pe lăncile de injectare aferente etapei 1 faza II și III, asigurând eficientizarea maximă de valorificare a potențialului energetic conținut în masa combustibilă a deșeurilor incinerate [22,23,24,25,26,27,68,69,70].

4.2. Incinerarea deșeurilor menajere prin arderea în masă

Tehnologia de tratare termică a deșeurilor menajere prin incinerarea în masă reprezintă procedeul cel mai răspândit de tratare, acoperind o gamă foarte variată de deșeuri, fiind caracterizat de o viabilitate și elasticitate în funcționare ce îi asigură primul loc în valorificarea energetică a deșeurilor menajere [1,24,56,68].

Această tehnologie este caracteristică incineratoarelor cu grătare mobile, care au rolul de a controla afânarea patului de deșeuri format pe suprafața grătarului, asigurând prin acest fel pătrunderea oxigenului în întreaga masă de deșeuri. Schema de principiu al unei astfel de unități de incinerare poate fi sintetizată ca în figura 4.3:

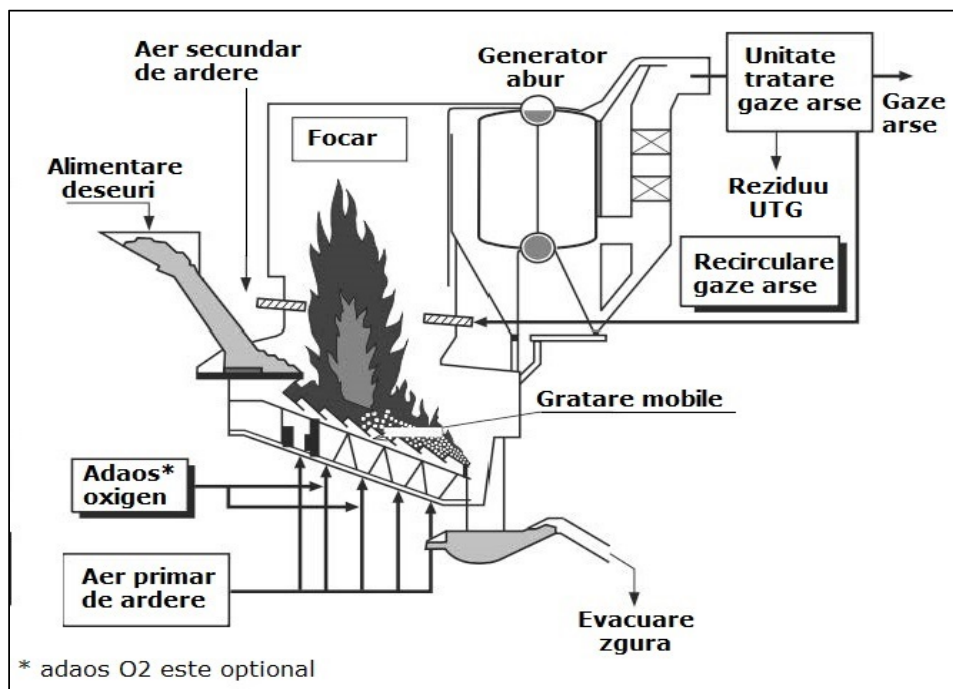


Figura 4.3 – Principul de funcționare al incineratoarelor cu grătare mobile [24]

62 Tratarea termică a deșeurilor menajere prin incinerare– 4

După cum se observă din figura 3.3, principiul de funcționare este foarte asemănător cu cel al termocentralelor pe cărbune, diferența majoră din punct de vedere constructiv fiind partea de jos a focarului (camerei de combustie), care în cazul incineratoarelor pentru deșeuri îl reprezintă grătarele mobile. Conform figurii 4.3, fluxul tehnologic de funcționare decurge astfel [1,56,68]:

- Alimentarea grătarelor mobile cu deșeuri se face prin pâlnia de alimentare cu o macara. Pâlnia de alimentare trebuie menținută la un nivel minim de încărcare pentru a preveni aportul de aer necontrolat în camera de combustie. Pâlnia este prevăzută cu dispozitive acționate hidraulic care au rolul de a controla fluxul de deșeuri introdus în camera de ardere; și de a preveni eventualele colmatări care pot apare în timpul alimentării cu deșeuri;
- Arderea masei deșeurilor are loc pe un dispozitiv de ardere cu grătare mobile care asigură atât avansarea deșeurilor cât și menținerea unei densități optime în masa deșeurilor, astfel se crează condiții optime pentru faza de ardere în masă. Prin modul lor de funcționare se asigură amestecul cu aerul de uscare (zona de lângă pâlnie) care constituie și aerul primar de ardere necesar procesului de incinerare. Practic grătarul este divizat în trei zone care corespund fazelor deșeurilor de uscare, combustie și răcire;
- Zgura și cenușa grosieră este colectată în partea inferioară a grătarului, fiind răcită într-un transportor cu racleți răcit cu apă. Zgura rezultată reprezintă deșeu ultim care se poate depozita în haldă fără probleme de mediu;
- Aburul se produce din apa de alimentare ce traversează pereții membrană ai focarului, separația fazei apă/abur are loc în taburul aferent cazanului, și este supraîncălzit în supraîncălzitoarele de abur (care pot fi în mai multe trepte) amplasate în drumul de evacuare al gazelor de ardere. Funcție de parametrii aburului obținuți, acesta este direcționat către producția de energie electrică într-un grup turbină-generator; sau dacă parametrii aburului sunt mai scăzuți către schimbătoare de căldură apă/abur pentru producerea de agent termic utilizat în termoficare. Producția cantității de abur și parametrii acestuia depind de sarcina de funcționare a cazanului. Eficiența energetică ridicată se obține la sarcină maximă a cazanului când valorificarea energetică se face într-un ciclu combinat CHP (Combined Heat and Power);
- Gazele de ardere sunt preluate de unitatea de tratare a gazelor de ardere care are rolul de a reține elementele poluante conținute în gazele de ardere, rezultate în urma procesului de ardere cum sunt SO₂, HCl, HF, NO_x și cenușă zburătoare. Pentru asigurarea unui grad ridicat de curățire al gazelor de ardere unitățile „state of the art” din domeniu, folosesc curățirea în patru trepte: absorber – filtru cu saci – filtru cu carbon activ – denoxare. Prin tratarea gazelor de ardere într-un astfel de concept se asigură un grad de curățire al gazelor de ardere de 99.99% [1,68].
- Reziduurile aferente unității de tratare a gazelor (UTG) de ardere concentrează și conțin elemente poluante (vezi cap.2.3). Datorită faptului că nu au aplicabilitate în alte ramuri industriale, aceste reziduuri sunt depozitate în haldă printr-un sistem de depozitare controlată, care trebuie să corespundă condițiilor de mediu.

Sub aspect constructiv există mai multe tipuri de grătare mobile, care în funcție de modul de avansare și amestecare a deșeului și de mișcarea elementelor componente ale grătarelor, se disting următoarele tipuri reprezentative [1,56]:

- Grătare mobile cu rolete;
- Grătare mobile cu plăci cu mișcare de avansare a deșeurilor înainte;
- Grătare mobile cu plăci cu mișcare de avansare a deșeurilor în revers (înapoi);

De obicei grătarele mobile sunt împărțite pe zone care divizează aria transversală a camerei de ardere. Grătarele din fiecare zonă pot fi mișcate independent, astfel se asigură omogenizarea patului de deșeurii incinerat odată cu introducerea unor șarje noi de încărcare. În figura 4.4 sunt prezentate cele trei tipuri principale de grătare mobile:

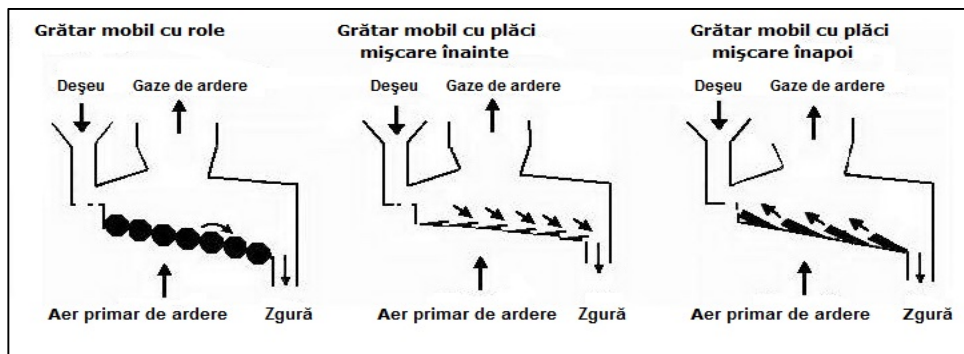


Figura 4.4 – Tipurile principale de grătare mobile [1]

Controlul menținerii gradului de omogenizare optim, al patului deșeurii incinerat pe suprafața grătarului se face cu o cameră infraroșu situată în partea superioară a focarului, cu ajutorul căreia se poate determina temperatura existentă în funcționare pentru fiecare zonă a grătarului [1,68].

mișcare înainte mișcare înapoi
Pentru creșterea eficienței energetice globale a unității de incinerare se practică și o recirculare a gazelor de ardere, astfel se recuperează o cantitate semnificativă de căldură care altfel s-ar pierde prin evacuarea la coș a gazelor de ardere. Utilizarea conceptului „oxygen boosting” presupune costuri de investiții suplimentare care necesită alocarea unor costuri pentru unitatea de producere a oxigenului.

Asigurarea producției continue de oxigen la scară industrială nu mai este o problemă tehnică, în acest sens se utilizează procedeul „PSA – Process Swing Adsorption”, care utilizează un material adsorbant ce reține oxigenul conținut în aerul ambiental [1,68].

4.3. Incinerarea deșeurilor menajere prin arderea în pat fluidizat

Tehnologia de tratare termică a deșeurilor menajere prin incinerarea în pat fluidizat este foarte răspândită pentru tratarea termică a deșeurilor de orice tip care prezintă o granulație relativ mică, în cele mai multe cazuri de max. 50mm. Funcție de varianta constructivă și de modul de formare al patului fluidizat acest tip de incineratoare pot să ardă și particule de dimensiuni mai mari 200-300mm [1].

Tehnologia presupune arderea particulelor de deșeurii prin menținerea în suspensie într-un pat fluidizat, realizat printr-un curent gazos în camera de combustie a cărui viteză trebuie să fie suficient de mare astfel încât să mențină în suspensia și mișcarea particulelor, în același sens cu curentul gazos.

Pentru crearea unui echilibru de menținere omogenă a masei fluide în suspensie, se utilizează un material auxiliar cu greutatea specifică mai mare decât cea a deșeurilor incinerate și granulozitate omogenă ca de exemplu nisip cu granulație de 1-5 mm. Menținerea suspensiei se face cu ajutorul aerului necesar arderii, care pune în mișcare aceste particule. Prin patul fluidizat format în acest mod se urmăresc:

- Comportarea statului fluidizat ca un lichid în fierbere fiind în permanență străbătut de jos în sus de bule de gaze;
- Valorile coeficienților de transmitere a căldurii între gaze și particulele solide sunt foarte mari astfel se poate realiza o temperatură constantă în toată masa stratului fluidizat.

Sub aspectul caracteristicilor patului fluidizat se disting trei categorii principale: pat fluidizat staționar, pat fluidizat rotativ și pat fluidizat circulant, viteza particulelor incinerate fiind mai mare în ultima categorie. Schema de principiu al unei unități de incinerare în pat fluidizat circulant poate fi sintetizată ca în figura 4.5:

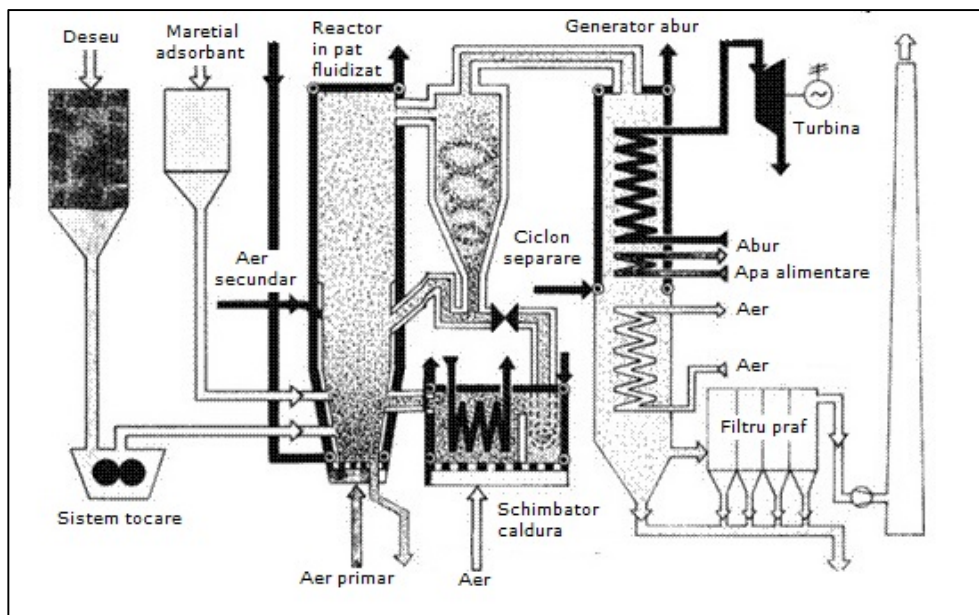


Figura 4.5–Principiul de funcționare al incineratoarelor în pat fluidizat circulant [74]

După cum se observă în figura 4.5 incinerarea deșeurilor în pat fluidizat se compune din două părți principale: camera de combustie în pat fluidizat și generatorul de abur, caracteristică specifică acestei tehnologii de incinerare. Conform figurii 4.5, fluxul tehnologic de funcționare decurge astfel [1,75]:

- Partea inferioară a focarului este prevăzută cu un grătar pe care se introduce materialul auxiliar de suspensie (nisipul). Sub grătar se află camera de insuflare a aerului primar de ardere, care ridică particulele în suspensie;
- Odată cu formarea patului fluidizat începe alimentarea camerei de combustie cu deșeuri prin injecție în patul fluidizat. Atingerea parametrilor de temperatură necesare autoaprinderii și întreținerii flăcării se face cu

ajutorul unui combustibil auxiliar (de obicei gaz metan sau păcură). Tot în această fază și material absorbant folosit în reținerea poluanților din gazele de ardere rezultate. Prin acest mod patul fluidizat joacă și rol de absorber;

- La parametri nominali de funcționare patul fluidizat are o temperatură uniformă în întreaga masă, astfel uscarea, volatilizarea și combustia nu mai sunt specifice anumitor zone din camera de combustie, ci se petrec simultan în ocupând volumul întreg al camerei de combustie;
- Separarea particulelor necombustibile (zgură, cenușă și nisip) din fluxul gazelor de ardere se face într-un ciclon. Gazele de ardere astfel curățite trec mai departe prin zona de recuperare energetică specifică generatoarelor de abur;
- Ciclul de utilizare al aburului și cel de tratare al gazelor de ardere este similar cu cel descris în cazul incineratoarelor cu grătare mobile (vezi cap.4.2);

Principalul avantaj al acestei tehnologii îl constituie faptul că asigură un grad ridicat de incinerare al particulelor de deșeuri, chiar dacă acestea au o putere calorică scăzută și un conținut mai ridicat de umiditate. Viteza de circulație a particulelor solide în patul fluidizat depinde de următorii factori:

- Mărimea particulelor;
- Masa specifică a particulelor;
- Masa specifică a combustibilului auxiliar;
- Vâscozitatea particulelor injectate.

Modul de mișcare al masei fluidizate influențează forma camerei de combustie, astfel mișcarea patului fluidizat aferent celor trei tipuri de fluidizare (staționar, rotativ și circulant) poate fi reprezentată ca în figura 4.6:

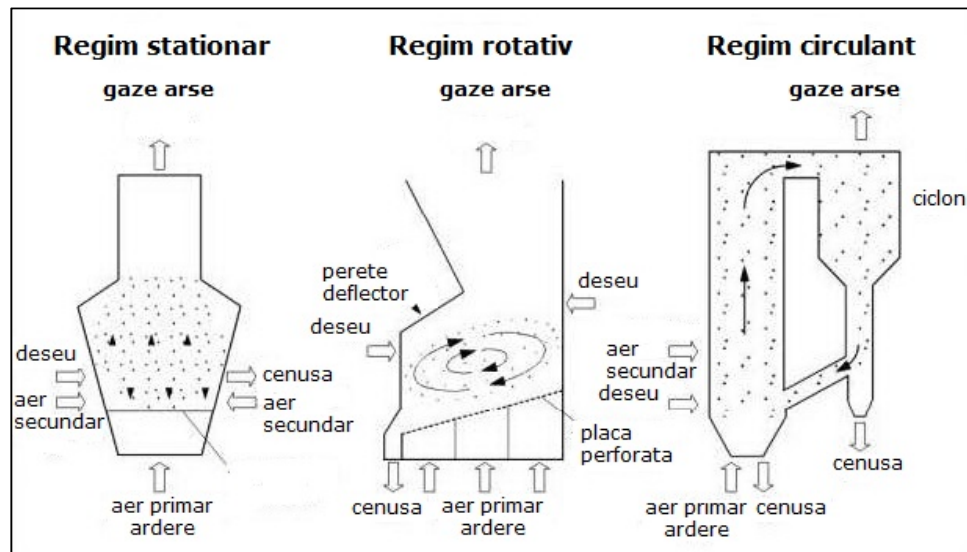


Figura 4.6 – Tipuri de combustie în patul fluidizat [75]

Principalul dezavantaj al aplicării acestei tehnologii în incinerarea deșeurilor menajere este faptul că deșeurile trebuie procesate și mărunțite înainte de

incinerare și uzurile sunt mai mari decât în cazul incinerării în masă pe sistem cu grătare mobile. Costurile ridicate pentru pretratarea anumitor categorii de deșeuri, face ca această metodă să nu fie fezabilă economic. Astfel acestea sunt folosite pentru tratarea termică a deșeurilor cu o compoziție mai omogenă din categoria nămolurilor provenite de la stațiile de epurare, combustibili derivați (RDF) și biomasă [1].

4.4. Incinerarea deșeurilor menajere în cuptoare rotative

Tehnologia de tratare termică a deșeurilor prin incinerarea în cuptoare rotative este foarte răspândită în tratarea termică a unei game variate de deșeuri, în special a celor cu un nivel ridicat de toxicitate.

Cuptoarele rotative sunt robuste și se comportă bine în funcționare pentru incinerarea deșeurilor cu o masă puternic heterogenă, cum este cazul deșeurilor menajere. Pot fi arse simultan atât deseuri solide cât și lichide fără perturbări de funcționare. Temperatura de funcționare normală a acestor incineratoare este cuprinsă între 850 – 1300 °C [1]. Schema de principiu al unei unități de incinerare în cuptoare rotative poate fi sintetizată ca în figura 4.7:

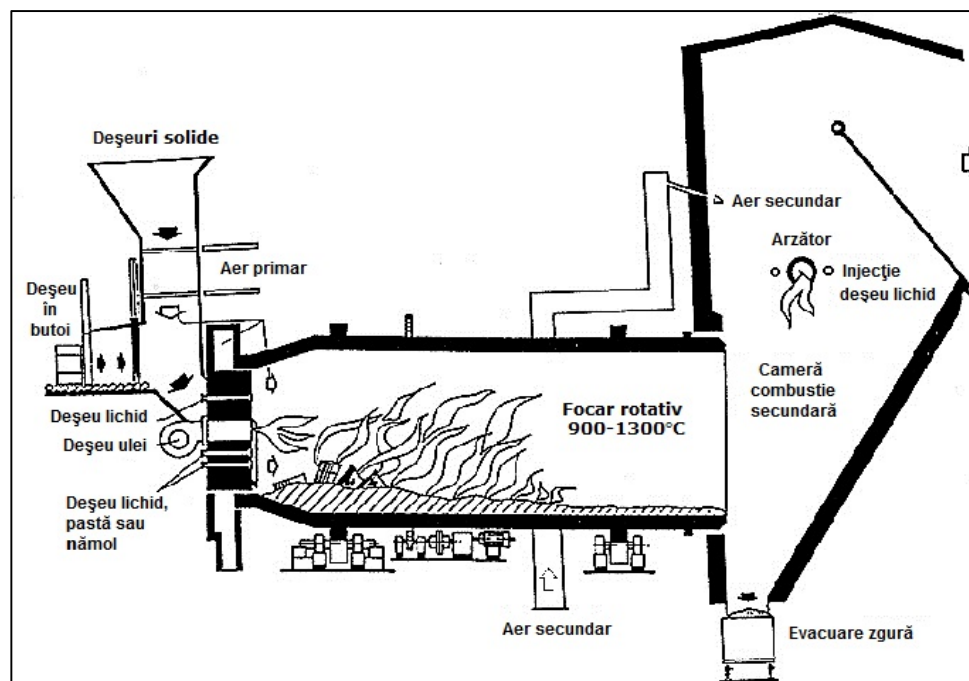


Figura 4.7 – Principiul de funcționare al incineratorului rotativ [80]

După cum se observă din figura 4.7 camera de combustie a incineratorului rotativ se împarte în camera de combustie primară și camera de combustie secundară. Camera de combustie primară este constituită dintr-un cilindru rotativ cu axa de rotație ușor înclinată. Alimentarea cu deșeuri se poate în camera de combustie primară, aici are desfășurarea fazelor specifice procesului de ardere, fiind

predominante fazele de uscare, volatilizare, ardere în masă și formarea zgurii. Arderea gazelor cu conținut ridicat de substanțe volatile greu combustibile se desfășoară în camera secundară de ardere situată la capătul cilindrului rotativ. Înclinarea cilindrului aferent camerei primare de combustie și mișcarea rotativă, asigură înaintarea masei de deșeu către zona de evacuare a zgurii respectiv afânarea masei incinerate. Astfel se asigură pătrunderea oxigenului și menținerea arderii în întreaga masă ceea ce eficientizează valorificarea energetică a conținutului combustibil din deșeu și totodată arderea completă a particulelor de deșeu.

Modul de alimentare cu deșeuri se poate face în mai multe moduri funcție de tipul deșeurilor incinerat solid sau lichid, astfel deșeurile solide sunt alimentate printr-o pâlnie similară cu cea din cazul incineratoarelor cu grătare; iar cele lichide pot fi injectate prin duze fie în camera primară fie în camera secundară, funcție de conținutul de substanțe greu combustibile [1].

În cazul incinerării deșeurilor toxice, camera secundară de ardere este prevăzută cu un sistem postcombustie care asigură distrugerea poluanților care se descompun în condiții ridicate de temperatură. În acest caz în mod curent temperatura în camera secundară este cuprinsă între 900-1200 °C. Prin funcționarea la asemenea temperaturi se asigură distrugerea totală a poluanților organici (PAH, PCB, PCDD/F).

Aceste caracteristici fac ca incineratoarele cu focare rotative să confere o flexibilitate largă în funcționare indiferent de compoziția deșeurilor incinerat. Șarjele de alimentare întâlnite în mod frecvent la acest tip de incineratoare pot incinera deșeuri cu o compoziție variabilă astfel [1]:

- Deșeuri solide 10-70%;
- Deșeuri lichide 25-70%;
- Deșeuri vâscoase 5-30%;
- Butoaie cu deșeuri până la 15%.

Partea cea mai expusă uzurii o reprezintă focarul rotativ, astfel pentru a-i prelungi durata de funcționare, la punerea în funcțiune a incineratorului se încarcă o șarjă cu un amestec de sticlă și nisip, se ridică la temperatură înaltă, formându-se un strat protector rezistent peste cărămidă refractară.

În funcționare se menține păstrarea acestui strat prin zgura rezultată din incinerarea deșeurilor și adăugarea suplimentară de nisip (când este cazul). Literatura de specialitate indică faptul că s-au încercat mai multe metode de protejare a stratului refractar, prin utilizarea unor materiale înalt aliate sau material refractar special, dar practica a dovedit că nu sunt la fel de viabile ca și prima metodă prezentată.

Funcție de compoziția deșeurilor și sarcina de încărcare viteza de rotație a focarului rotativ variază între 3-40 rotații/oră. Unghiul de înclinare al cilindrului rotativ este maxim 5 grade [1]. Principalul dezavantaj care împiedică răspândirea la scară largă a tratării termice a deșeurilor menajere în astfel de incineratoare o constituie limitarea recuperării energiei termice, în special din zona focarului rotativ [81].

4.5. Studiu de caz 3 - incineratorul pentru deșeuri menajere de la KRV Arnoldstein - Austria

4.5.1 Implementarea proiectului de incinerare a deșeurilor menajere

Începând cu anul 2009 legislația impusă la nivel european stipulează faptul că depozitarea în haldă a deșeurilor menajere nu mai este permisă fără o tratare prealabilă corespunzătoare (Directiva nr.33/2003/EEC). Zona Carinthia din Austria are o populație de peste 630 mii de locuitori care produce o cantitate anuală de deșeuri menajere de 100 000 tone pe an.

Acest fapt a grăbit autoritățile locale pentru găsirea unor soluții fezabile pentru tratarea deșeurilor menajere care să corespundă cu legislația în vigoare, astfel pe baza conceptului „Waste-to-Energy (WtE)” au decis implementarea tratării termice prin incinerare. Acest concept rezolvă atât cerințele de depozitare în haldă prin reducerea și igienizarea volumului depozitat; cât și un aport economic prin valorificarea potențialului energetic a deșeurilor [68,69,70].

Implementarea proiectului îi aparține consorțiului Kärntner Restmüllverwertungs – KRV (Compania de valorificare a deșeurilor) care în prezent este compusă din KELAG – Kärntner Elektrizitäts Aktiengesellschaft cu 75% și Saubermacher cu 25%. Durata totală a implementării proiectului sintetizată pe faze derulate în timp a fost următoarea:

- 1995-1996 – luarea deciziilor la nivel politic în ce privește investiția și demararea proiectului;
- 1997-1998 – analiza ofertelor pentru realizarea implementării proiectului și semnarea contractului;
- 1999 – alegerea locației optime de construcție a incineratorului;
- 2000 – prepararea studiului de impact asupra mediului înconjurător pentru locația stabilită;
- 2001-2002 – procedura de obținere a autorizațiilor pentru implementarea proiectului în zona stabilită;
- 2003-2004 – construcția și punerea în funcțiune a unității de incinerare.

Ca valoare de investiție implementarea proiectului de tratare termică a deșeurilor menajere prin incinerare a costat 75 mil. euro, și s-a optat pentru soluția de ardere în masă în incinerator cu grătare mobile.

Costul ridicat al investiției se reflectă în tehnologia „state-of-the-art” implementată, astfel s-a utilizat tehnologia SYNCOM-PLUS® (Synthetic Combustion – Plus) dezvoltată pe baza conceptului „oxygen boosting” ce presupune creșterea concentrației de oxigen în aerul primar de ardere până la valori de 28-30 %, și sinterizarea cenușii grosiere prin recirculare în camera de ardere. Această tehnologie se caracterizează prin emisii scăzute și eficiență ridicată a procesului de ardere, care implicit crește gradul de valorificare a potențialului energetic al deșeurilor incinerate.

Prima implementare la scară industrială a tehnologiei SYNCOM-PLUS s-a realizat la incineratorul KRV-Arnoldstein descris în studiul de caz prezentat. Incinerarea deșeurilor se realizează pe un sistem de grătare mobile cu mișcare reversibilă, adică în sens opus înaintării masei de deșeu incinerat pe suprafața grătarelor. Sistemul de grătare utilizat este produs de compania Martin GmbH, care are peste 425 de sisteme cu grătare implementate la nivel mondial, din care peste 300 de tipul celui implementat la KRV-Arnoldstein (grătare cu mișcare reversibilă).

Unitatea de incinerare studiată, asigură valorificarea energetică a deșeurilor prin producere de energie electrică și termică. Prin amplasare incineratorului pe platforma industrială EURONOVA din Arnoldstein, energia termică este utilizată în mod continuu ca agent termic și abur tehnologic pentru unitățile producătoare din vecinătate. În sezonul rece, unitatea are capacitate de a furniza agent termic pentru încălzirea orașului Arnoldstein, asigurând încălzirea peste 1100 de locuințe și 280 de clădiri publice [68].

Energia electrică este produsă într-un sistem turbină cu abur-generator, asigurând consumul de energie electrică necesar funcționării întregii unități de incinerare precum și exportul unei cantități de energie prin livrarea în sistemul național de energie electrică din Austria. Funcționarea continuă în cogenerare (CHP – Combined Heat and Power) îi asigură o eficiență economică ridicată.

În plus, prin optimizarea procesului de ardere și mentenanță a unității de incinerare, s-a reușit creșterea capacității de incinerare de la valoarea de 80 000 tone de deșeu pentru care a fost proiectată instalația la 96 000 tone în anul 2014 [68]. Acest lucru a fost posibil datorită faptului că exploatarea practică a incineratorului, nu numai că a confirmat teoria pusă în aplicare a conceptului SYNCOM-PLUS, dar a se depăși așteptările [68]. Atingerea acestor performanțe se datorează și sistemului de colectare și transport a deșeurilor care furnizează o masă de deșeu de calitate cu conținut scăzut de umiditate astfel încât asigură o putere calorifică inferioară de 10000 kJ/kg.

4.5.2 Descrierea fluxului tehnologic al unității de incinerare

Tratare termică a deșeurilor municipale prin tehnologia incinerării în masă pe grătare mobile este cel mai răspândit procedeu la nivel mondial datorită valorificării potențialului energetic al deșeurilor și a cantităților reduse a reziduurilor aferente procesului de incinerare prin utilizarea unei tehnologii moderne de tratare a gazelor de ardere. Schema de concept care sintetizează fluxul tehnologic aferent unității de incinerare KRV-Arnoldstein este prezentat în figura 4.8:

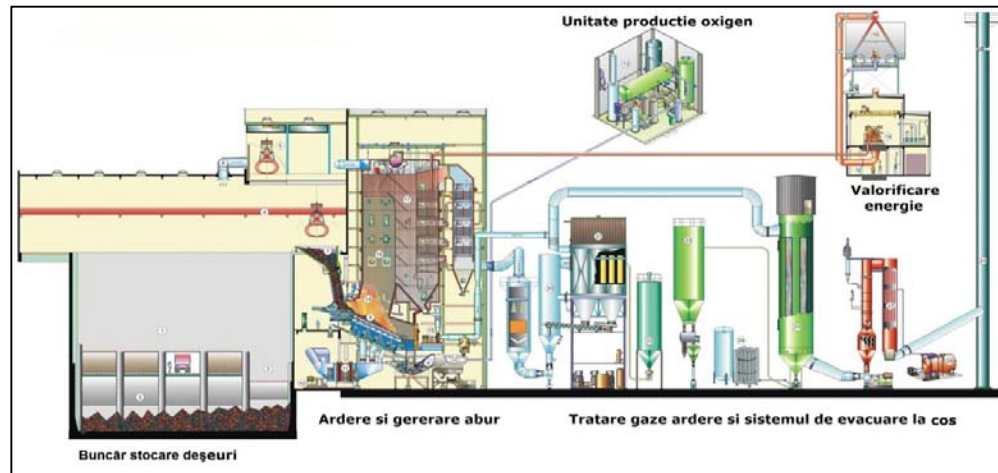


Figura 4.8 – Schema de concept a unității de incinerare KRV-Arnoldstein [70]

Conform figurii 4.8 părțile componente ale fluxului tehnologic aferente unității de incinerare se împart în patru grupe principale:

1. *Sistemul de stocare și alimentare deșeuri* – cuprinde patru porți de recepție care preiau deșeurile direct din camioanele de transport fără nici o prelucrare ulterioară, și o poartă prevăzută cu un sistem de mărunțire și tocarea pentru deșeurile care necesită acest lucru. Deșeurile sunt stocate într-un bunker de beton prevăzut cu o macara care alimentează camera de ardere prin intermediul unei pâlnii acționare hidraulic.
2. *Sistemul de incinerare* – este alcătuit din grătarul mobil și unitatea de producere a oxigenului necesar sistemului SYNCOM-Plus. Deșeurile sunt alimentate prin pâlnia aferentă grătarului mobil reversibil, unde are loc uscarea și arderea masei solide a deșeurilor. Cantitatea de oxigen utilizată pentru îmbogățirea aerului primar de ardere este produsă prin metoda PSA (Pressure Swing Adsorption) într-o unitate separată.
3. *Sistemul de valorificare energetică* – care cuprinde generatorul de abur și grupul de cogenerare. Aburul este produs într-un generator de abur în contra curent cu pereți membrană și patru trepte de supraîncălzire a aburului. Aburul produs este destinat în două turbine în condensatie cu prize de abur pentru colectarea de abur aferent sistemului de producere a agentului termic.
4. *Sistemul de tratare a gazelor de ardere* – care curăță fluxul de gaze în patru trepte trecând gazele consecutiv prin: absorber uscat, filtru cu saci, filtru cu carbon activ și denoxare catalitică. Astfel se asigură un grad de curățire a gazelor de ardere de până la 99.99%.

Unitatea de incinerare a deșeurilor menajere de la KRV Arnoldstein utilizează tehnologie de ultimă generație în ce privește incinerarea deșeurilor și tratarea gazelor de ardere.

4.5.2.1 Sistemul de stocare și alimentare deșeuri menajere

Deșeurile menajere în amestec preluate la poarta incineratorului sunt depozitate direct în buncărul de depozitare principal, fără nici o sortare prealabilă, sau analiza componenței acestora, încadrarea în gradele de pericolozitate al deșeurilor incinerate intră în sarcina unităților de colectare și transport deșeuri [68]. Stocarea deșeurilor se face într-un bunker de beton, alimentat prin cele patru porți menționate anterior. Bunkerul este dimensionat astfel încât să asigure preluarea unui flux de deșeuri pentru 24 h/zi 350 zile pe an, și o capacitate de stocare deșeuri care asigură o rezervă de „combustibil” pentru 14 zile, astfel se asigură stocarea deșeurilor în perioada de mentenanță anuală a unității de incinerare.

După cum se observă din figura 4.8, volumul util al bunker-ului este aprox. 1/3 din volumul total, și ocupă partea situată sub cota zero a amplasamentului. Bunkerul de stocare nu este prevăzut cu sistem de drenare, o dată pe an se verifică etanșeitatea prin inspecția părții inferioare a bunker-ului.

Partea superioară a bunker-ului de stocare este prevăzută cu un sistem de ventilare, care are rol de a crea o depresiune de ordinul milibarilor (mbar) cu scopul de a elimina poluarea cu miros neplăcut a mediului ambiant. În plus, aerul infestat captat din bunker este utilizat ca aer primar de ardere, astfel mirosul și volatilitatea conținute în aerul infestat sunt neutralizate prin ardere. Porțile de preluare a deșeurilor aferente bunkerului se deschid doar în momentul alimentării cu deșeuri. Tot în partea superioară a bunkerului de stocare sunt prevăzute 2 macarale (una în

funcțiune și una în rezervă), cu care se controlează distribuția masei de deșeu depozitat în bunker, și prin intermediul cărora se face alimentarea pâlniei grătarului de incinerare. Pentru a acoperi întreaga suprafață a bunkerului de stocare, macaraua rulează pe șine de la un capăt la altul (vezi fig.4.8). Modul de funcționare al sistemului de alimentare cu deșeuri este prezentat în figura de mai jos:

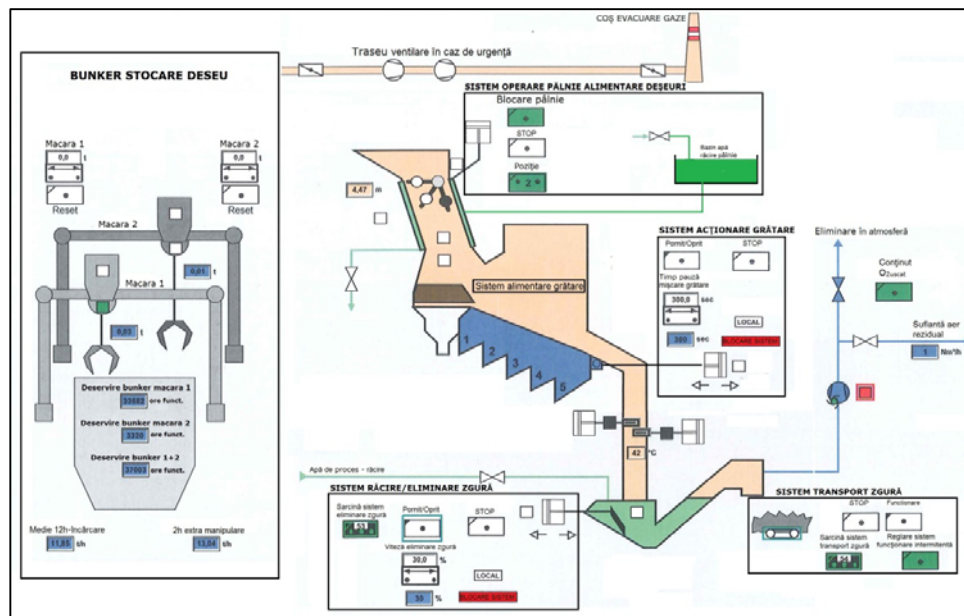


Figura 4.9 – Sistem alimentare deșeuri KRV Arnoldstein[69]

Figura 4.9 reprezintă schema de monitorizare și control a sistemului de alimentare cu deșeuri, preluată „on-site” din camera de comandă a unității de incinerare studiate. După cum se observă în figura de mai sus sistemul de alimentare cu deșeuri este sincronizat și cu sistemul de evacuare zgură de grătar și mișcarea grătarelor de pe ultima porțiune a grătarelor aferentă zonei 5. Pentru prevenirea creșterii temperaturii și a autoaprinderii deșeurilor în pâlnia de alimentare, este prevăzut un sistem de răcire cu apă care răcește pereții acesteia.

În perioada de mentenanță când unitatea de incinerare nu funcționează, sistemul de ventilație este prevăzut cu un sistem care refulează aerul captat direct la coșul de evacuare al gazelor arse, într-o diluție suficient de mare. În acest caz, pentru perioada de mentenanță (max. 2 săptămâni), prognoza emisiilor în atmosferă intră într-un alt regim de valori admisibile prevăzute în Declarația de Impact asupra Mediului aferentă ununității de incinerare. Valorile emisiilor stabilite în acest regim special trebuie să asigure un grad de curățire al aerului evacuat la coș astfel încât să nu polueze cu miros neplăcut zona adiacentă unității de incinerare, chiar și în cazurile nefavorabile cum este cel din perioada de mentenanță. Pentru realizarea acestui lucru, aerul captat din bunker-ul de stocare, este trecut prin by-pass, direct în filtru cu carbon activ, unde mirosul este reținut.

Monitorizarea, analiza, înregistrarea și arhivarea emisiilor de gaze eliminate la coș sunt realizate într-o unitate complet automatizată, fiind echipată cu sisteme de transmitere a datelor în timp real, direct către agenția de protecție a mediului.

4.5.2.2 Sistemul de incinerare deșeuri menajere

Sistemul de incinerare este compus din grătarul mobil și focarul generatorului cu abur. În sistemul de ardere pe grătare mobile are loc faza de ardere primară a deșeurilor, fiind caracterizată de uscare, volatilizare și arderea în masă prin combustia carbonului fix; iar în focarul generatorului de abur are loc faza de ardere secundară caracterizată de combustia gazelor și volatilelor cu prag de ardere la temperatură ridicată, generate din prima faza (vezi cap. 4.1). Cele două componente ale sistemului de incinerare funcționează împreună, grătarul mobil fiind integrat în partea inferioară a generatorului de abur.

În urma analizei sistemului de incinerare din prezentul studiu de caz am concluzionat că acesta reprezintă o una din primele metode de ardere a cărbunelui, fiind aplicată în centrale termice pe cărbune timpurii. La ora actuală acest procedeu nu se mai aplică pentru arderea cărbunelui, întrucât datorită compoziției omogene a cărbunelui a fost posibilă dezvoltarea unor tehnologii de ardere prin pulverizarea cărbunelui, fapt care asigură o eficiență energetică și economică ridicată.

Sistemul de ardere pe grătare mobile este destinat arderii deșeurilor menajere în amestec, cu compoziție puternic eterogenă, fără prelucrare anterioară a masei de deșeu incinerat. Acest fapt, precum și fiabilitate și flexibilitatea dovedită în exploatarea de-a lungul timpului, propulsează sistemele de ardere pe grătare mobile în vârful tehnologiilor de tratare termică a deșeurilor menajere, fiind cel mai răspândit procedeu la nivel mondial. Ca și componentă sistemul de ardere pe grătare mobile se împarte în:

- Pâlnie alimentare deșeuri,
- Planul înclinat de ardere cu grătare mobile cu mișcare reversibilă,
- Unitate de alimentare cu aer primar de ardere,
- Sistem de răcire cu apă și evacuare zgură,
- Sistem producere oxigen (auxiliar).

În cazul nostru, acest sistem este eficientizat energetic prin implementarea tehnologiei de „oxygen boosting”, care presupune creșterea conținutului de oxigen în aerul de ardere de la 21% volumic la 28–30%. Unitatea de incinerare analizată în prezentul studiu de caz, utilizează un grătar de ardere Martin SYNCOM-Plus® dotat cu tehnologia oxygen-boosting. Prima implementare la scară industrială a acestui concept pentru incineratoarele de deșeuri menajere în amestec, la nivel mondial a fost implementată în 2004 la unitatea de incinerare a deșeurilor KRV-Arnoldstein [68, 102].

Față de modul de funcționare obișnuit al unui incinerator cu grătare mobile (vezi cap. 4.2), tehnologia SYNCOM-Plus se deosebește prin controlul foarte eficient al arderii realizat prin:

- modificarea parametrilor aerului primar de ardere,
- monitorizarea arderii pe grătar printr-o cameră infraroșu,
- recircularea gazelor de ardere,
- sinterizarea cenușii grosiere prin recirculare în focar.

Aplicarea într-un flux tehnologic a procedeelor menționate mai sus duce la reducerea emisiilor de ardere și eficiență ridicată a procesului de ardere, care implicit crește gradul de valorificare a potențialului energetic al deșeurilor incinerate. Îmbogățirea cu oxigen a aerului primar de ardere are un rol foarte important în

capacitatea de incinerare a unității, informativ, dacă nu se utilizează oxigen în aerul de ardere capacitatea de incinerare este de 30 t/h, iar cu oxigen capacitatea de incinerare crește la 40 t/h. Transpus în procente înseamnă 133.33% creștere a capacității de incinerare raportat la aceleași dimensiuni constructive. Ca și concept, principiul de funcționare SYNCOM-Plus este prezentat în figura 4.10:

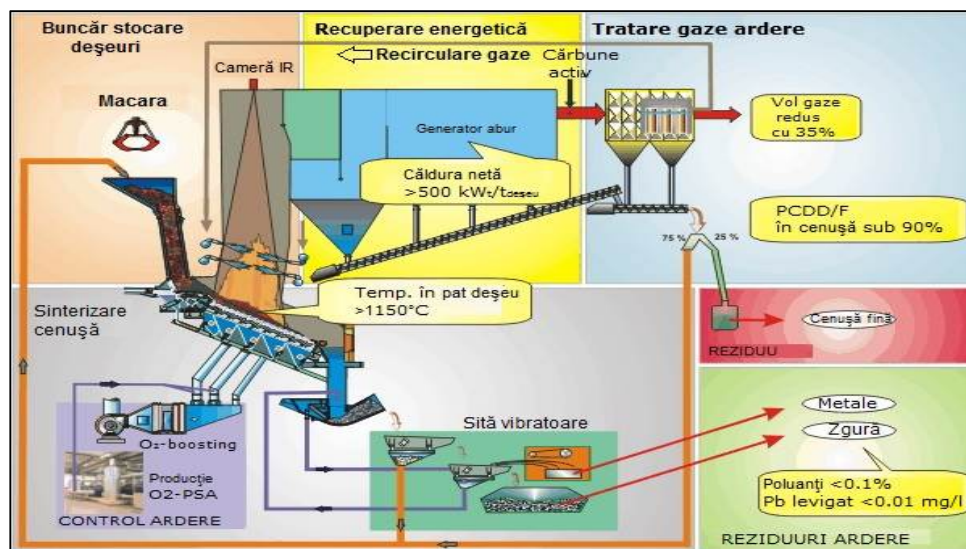


Figura 4.10 – Conceptul SYNCOM-Plus® (Synthetic Combustion – Plus)[102]

Alimentarea cu aer primar de ardere a se face prin patru zone de insuflare situate în partea inferioară a grătarului. Prima zonă de insuflare utilizează aer fără adaos de oxigen și corespunde fazei de uscarea, volatilizare și inițierea arderii, fiind situată în partea de deversarea a pâlniei de alimentare cu deșeuri. Zona 2 și 3 corespunde fazei de ardere în masă a deșeului caracterizată de combustia hidrocarburilor conținute în materia ce formează deșeurile. Pentru eficientizarea arderii complete a particulelor solide prin zona 2 și 3 se insuflă aer cu adaos de oxigen. Zona 4 corespunde fazei de finalizare a arderii în masă fiind caracterizată de vitrificarea și consolidarea reziduurilor necombustibile prin formarea zgurii. Prin zona 4 se insuflă aer fără adaos de oxigen.

Grătarul mobil este divizat în 6 sectoare, fiecare sector cu mișcare independentă a grătarelor și alimentare separată cu aer primar de ardere. Distribuția sectoarelor este prezentată în tabelul 4.1:

Tabelul 4.1 – Distribuția sectoarelor pe grătarul mobil de ardere

S11	S21	S31	S41(S51)
S12	S22	S32	S42(S52)

Prin urmare fiecare zonă de insuflare cu aer primar de ardere deservește două sectoare ale grătarului de ardere. Distribuția, debitul și zonele de insuflare a aerului primar de ardere sunt sintetizate în figura 4.11:

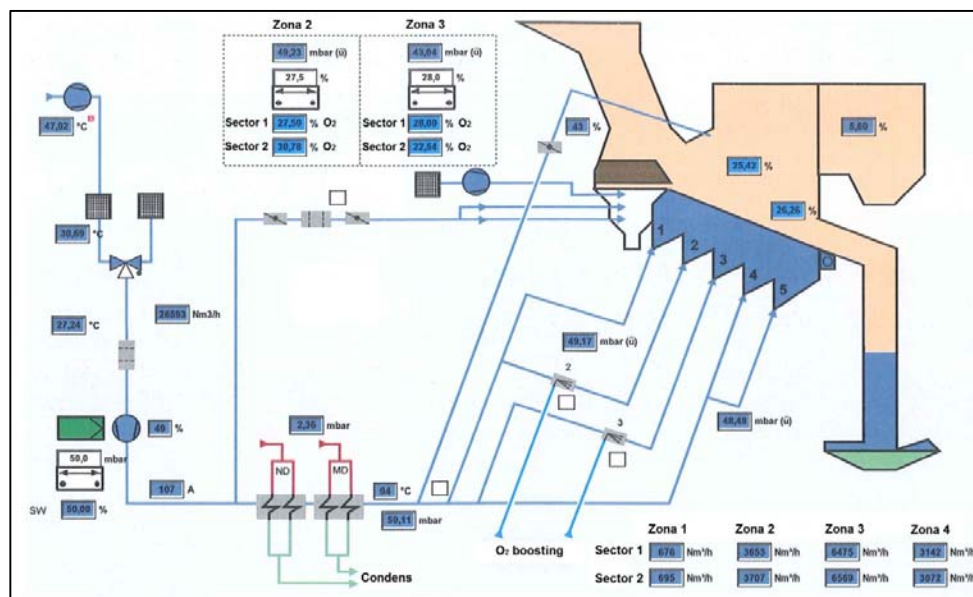


Figura 4.11 – Schema de control aer primar ardere KRV Arnoldstein[69]

Figura 4.11 reprezintă schema de monitorizare și control a aerului primar de ardere preluată „on-site” din camera de comandă a unității de incinerare studiate. Zona 5 de insulfare aer, este utilizată pentru răcirea zgurii, și se folosește o parte din debitul introdus prin zona 4. Conform figurii de mai sus se poate observa că debitul de aer primar de ardere introdus variază pentru fiecare sector de ardere. Acest fapt se datorează caracterului eterogen al masei de deșeu incinerat, care implică temperaturi de ardere diferite, deci, cantități de aer necesar diferite.

Controlul arderii se realizează prin corelarea între mișcarea grătarelor, debitul de aer insuflat și cantitatea de oxigen suplimentată în aerul de ardere pentru fiecare sector. Acest fapt este posibil prin monitorizarea temperaturii pe suprafața grătarului de ardere realizat prin camera infra roșu.

Monitorizarea în timp real a temperaturii pe suprafața grătarului de ardere face posibilă ajustarea imediată a parametrilor de ardere, fapt care îi conferă sistemului de ardere SYNCOM-Plus o elasticitate și flexibilitate în funcționare care asigură o valorificare energetică a deșeurilor menajere foarte eficientă. Recircularea unei părți din gazele de ardere are scopul de a recupera o parte din energia conținută în gaze, și de a o utiliza în aerul secundar necesar arderii.

Prin îmbogățirea aerului primar cu oxigen se crește temperatura în patul de deșeu incinerat 1150-1250°C, temperatură care duce la sinterizarea cenușii gosirere recirculată, transformând-o într-o zgură vitroasă foarte stabilă fizic și chimic sub acțiunea intemperiiilor în condițiile depozitării în haldă.

Imbogățirea cu oxigen a aerului primar de ardere duce implicit la scăderea cantității de aer necesar arderii și implicit la scăderea volumului de gaze evacuate la coș cu 35 % și o recuperare energetică de peste 500 kWh/t deșeu incinerat [102].

Oxigenul de îmbogățirea a aerului primar de ardere se produce într-o unitate separată care funcționează pe principiul PSA – Pressure Swing

Adsorption. Tehnologia PSA separă oxigenul din aerul atmosferic pe principiul adsorbției moleculare în masa unui material adsorbant, care reține oxigenul în condiții de presiune ridicată și îl eliberează la presiune normală.

În cazul de studiat este utilizat zeolitul ca material adsorbant. Principiul de funcționare al unității de producție a oxigenului este prezentat în figura 4.12:

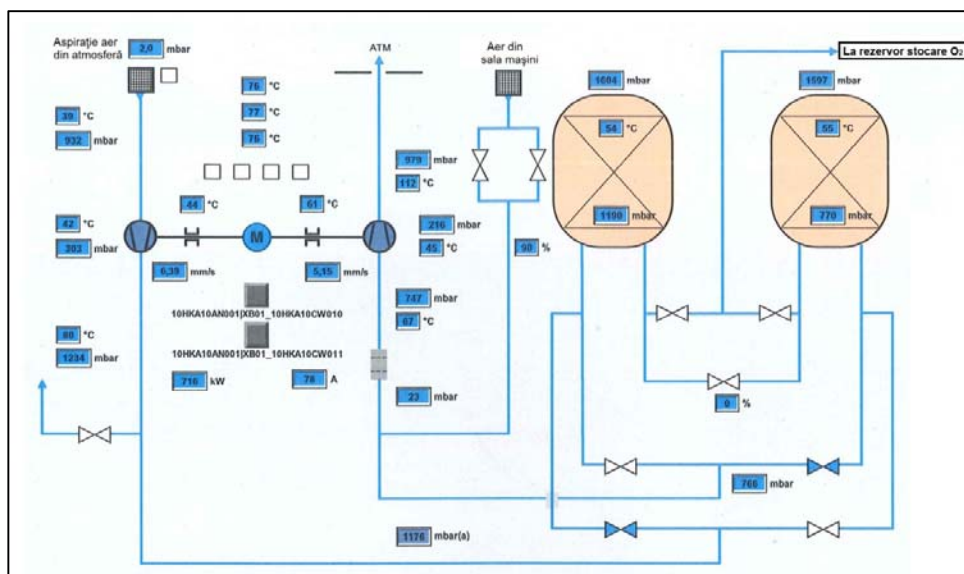


Figura 4.12 – Schema de producție oxigen KRV Arnoldstein [69]

Figura 4.12 reprezintă schema de monitorizare și control a unității de producere a oxigenului de îmbogățire aer primar ardere, preluată „on-site” din camera de comandă a unității de incinerare studiate. Conform figurii 4.12 aerul este preluat din atmosferă de un compresor care refulează prin patul de material adsorbant din rezervorul în faza de încărcare. În acest timp celălalt rezervor se află în fază de descărcare. Când materialul adsorbant atinge pragul maxim de încărcare cu oxigen, începe fază de încărcare a celui de-al doilea rezervor, iar primul trece în faza de descărcare. Prin funcționarea alternativă sincronizată a celor două rezervoare de adsorbție se asigură un debit constant de oxigen.

Puritatea oxigenului obținut prin această metodă este de cca 92-93%, suficientă pentru îmbogățirea aerului primar de ardere. Informativ, cantitatea suplimentară de oxigen raportată la un debit masic incinerat de deșeuri menajere de 11.5 – 12.5 t/h este de 1800–2200 m³/h O₂, iar pentru producerea acestei cantități de oxigen se consumă 1.2 MWe/h.

4.5.2.3 Sistemul de valorificare energetică

Sistemul de valorificare energetică cuprinde generatorul de abur, două turbine pe abur și schimbătoarele de căldură abur/apă pentru producerea agentului termic de termoficare. Inițial instalația de producere a energiei electrice a fost prevăzută doar cu o turbină în condensatie, care funcție de regimul și modul de funcționare poate produce energie termică între 0–9 MWth și energie electrică 0.8–5 Mwe [70].

În urma optimizării unității de incinerare s-a ajuns la o creștere a cantității de deșuri incinerate de la 80 000 t/an la 96 000 t/an, a crescut proporțional și cantitatea de abur produs, astfel s-a optat pentru valorificarea electrică a acestui surplus de abur prin valorificare într-o turbină în condensatie cu regim de pornire/oprire rapidă de 3 MW.

Sistemul de preparare a agentului termic pentru încălzire este legat de sistemul de turbină cu abur, întrucât aburul necesar în acest sens este preluat de pe prizele de abur aferente turbinei. Schema simplificată a sistemului de valorificare energetică aferent unității de incinerare studiate este prezentat în figura 4.13:

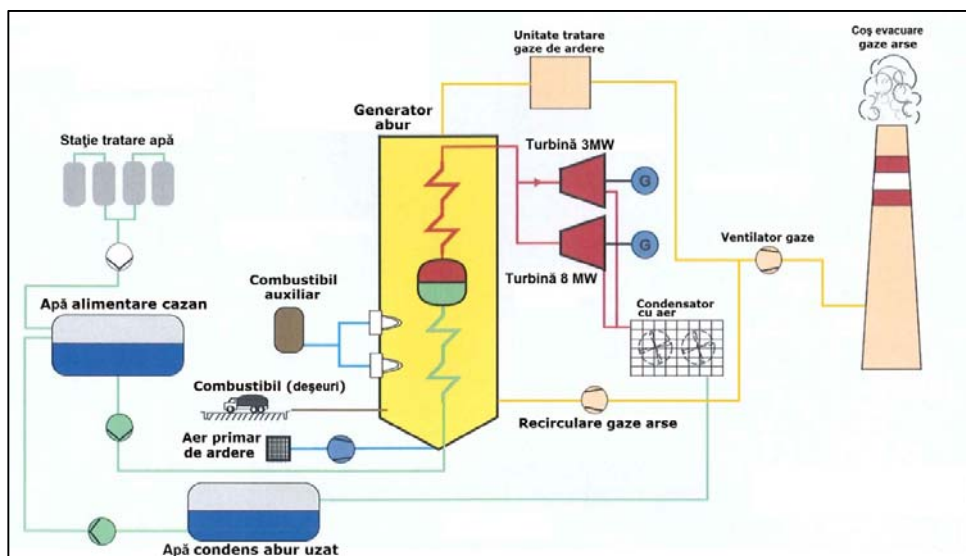


Figura 4.13 – Schema de valorificare energetică KRV Arnoldstein[69]

Conform figurii de mai sus, generatorul de abur este alimentat cu apă tratată în scopul demineralizării pentru evitarea depunerilor de piatră pe suprafețele de schimb de căldură. Apa trece prin pereții membrană ai generatorului, preia căldură din focar și se transformă în abur saturat. Aburul astfel format este colectat în tambur, unde are loc faza de separație abur/apă. Supraîncălzirea aburului are loc în patru trepte, în ultima treaptă atingând parametrii de presiune și temperatură de 40 bar și 400°C.

Debitul maxim de abur produs de cazan este de 40 t/h. Aburul astfel obținut este destinat în cele două turbine, care la rândul lor produc lucru mecanic ce acționează generatoarele electrice. O parte din cantitatea de energie electrică produsă este consumată în procesul de funcționare al unității de incinerare, iar restul este livrat în sistemul energetic național din Austria, sau vândut direct consumatorilor de energie electrică de pe platforma industrială din vecinătatea unității de incinerare.

Parametrii aburului uzat la ieșirea din turbina de 3 MW sunt de 0.16 bar_a și 50°C, iar pentru turbina de 8 MW de 0.20 bar_a și 60°C. Aburul uzat este condensat într-un condensator răcit cu aer, iar condensatul este reintrodus în sistemul cu apă de alimentare cazan.

Condensatorul de abur are două regimuri de funcționare de vară și iarnă, diferența între cele două regimuri fiind dată de sensul de alimentare cu abur al

schimbătoarelor de căldură convective aferente. Astfel în regim de vară, alimentarea acestora se face de sus în jos, iar iarna de jos în sus prevenind astfel înghețul condensului în schimbătoarele de căldură prin faptul că condensul format curge gravitațional în partea de jos, timp în care este încălzit de aburul uzat care urcă.

4.5.2.4 Sistemul de tratare gaze de ardere

Sistemul de tratare al gazelor de ardere cuprinde patru trepte de curățire a gazelor de ardere, principiul fluxului de curățire fiind reprezentat în figura de mai jos:

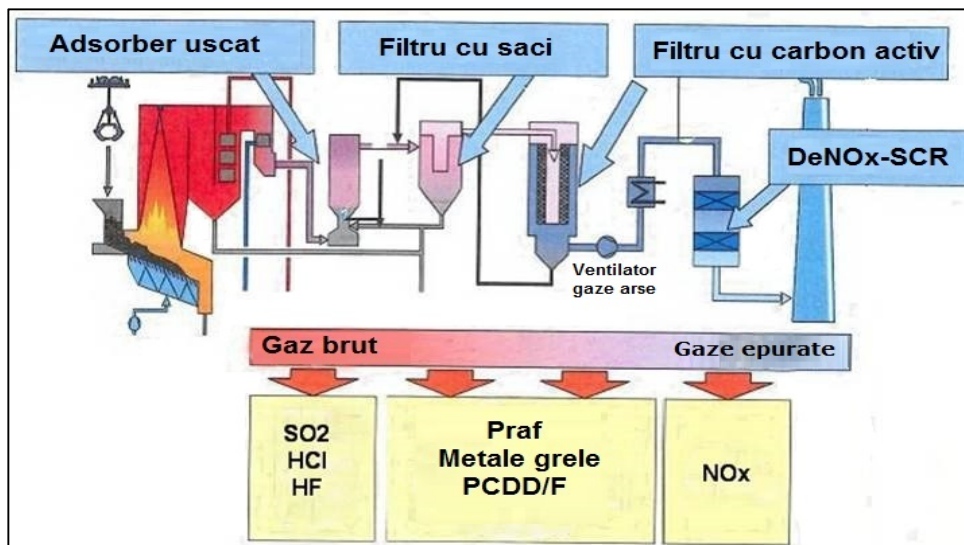
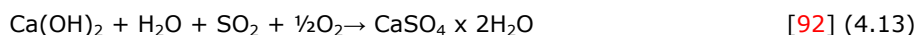
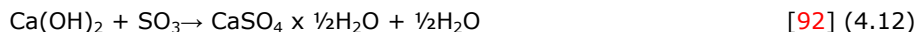
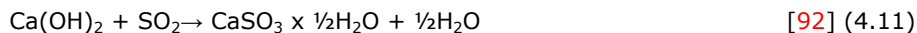


Figura 4.14 – Tratarea gazelor de ardere în patru trepte KRV Arnoldstein [68]

Conform figurii de mai sus, gazele de ardere trec consecutiv prin adsorber uscat, filtru cu saci, filtru cu carbon activ și denoxare catalitică. Vehicularea gazelor este realizată de ventilatorul situat după filtrul cu carbon activ, astfel se crează o depresiune în focar, adsorber și filtru cu saci care prevenind eventualele scăpări de gaze prin neetanșeități.

Treapta I și II – aici are loc curățirea gazelor de dioxizi de sulf (SO₂), cloruri (HCl), fluoruri (HF) și cenușă zburătoare; treapta I fiind reprezentată de un adsorber uscat în pat fluidizat; iar treapta II de filtrul cu saci aferent adsorberului, ambele fiind componente specifice procedurii de curățire uscat și semi-uscat ce utilizează ca material adsorbant Ca(OH)₂. Reacțiile chimice care stau la baza adsorbției poluanților în treptele I și II sunt:



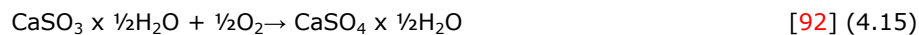
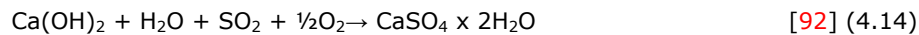


Figura 4.15 sintetizează ansamblul funcțional pentru treptele de curățire I și II:

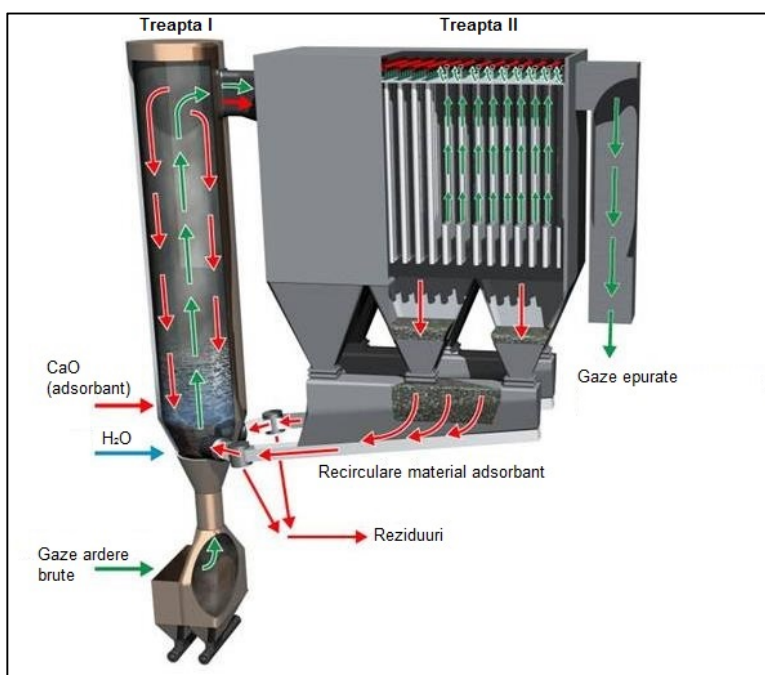


Figura 4.15 – Sistem scrubber uscat KRV Arnoldstein [68]

Gazele de ardere intră în adsorber prin partea inferioară, fiind accelerate prin trecerea lor printr-o zonă cu efect venturi, unde are loc scăderea temperaturii prin injecție de apă. Reducerea de temperatură rezultată și creșterea conținutului de vapori al gazelor de ardere, precum și formarea unei pelicule cu suprafață lichidă pe particulele de praf, contribuie la eficientizarea procesului de adsorpție a poluanților.

În adsorber gazul brut intră în contact turbulent cu materialul adsorbant (Ca(OH)_2) și cu produsul recirculant intern și extern. Cea mai mare parte a particulelor de material adsorbant este precipitată în partea superioară a reactorului de desulfurare după care coboară de-a lungul pereților, în partea inferioară a acestuia. Gazele de ardere ies din reactor prin partea superioară și intră în filtrul de saci din aval unde are loc desprăfuirea gazelor de ardere.

Curățirea filtrului cu saci se face prin insuflarea periodică inversă cu aer comprimat a sacilor, din interior spre exterior îndepărtând astfel crusta formată pe sacii filtrului. Materialul absorbant scuturat de pe saci cade în pâniile din partea inferioară a filtrului și de aici este preluat de sistemul de reculare material absorbant. Cea mai mare parte a materialului absorbant colectat aici este recirculată în reactorul de desulfurare, restul este evacuat în silozul de reziduu.

Principiul de funcționare al adsorberului și al patului fluidizat extern fac posibilă stabilirea unor perioade lungi de remanență a particulelor solide, îmbunătățind eficiența de curățire a gazelor de ardere și utilizarea eficientă a materialului absorbant.

Treapta III– se desfășoară într-un filtru cu carbon activ în pat fix, unde are loc reținerea metalelor grele și a dioxinelor și furanilor. Acest sistem de filtrare reține substanțele toxice atât în fază gazoasă cât și în fază de particule solide foarte fine, și are la bază proprietățile adsorbante ale cărbuneului. Modul de funcționare al filtrului cu carbon activ studiat este prezentat în figura de mai jos:

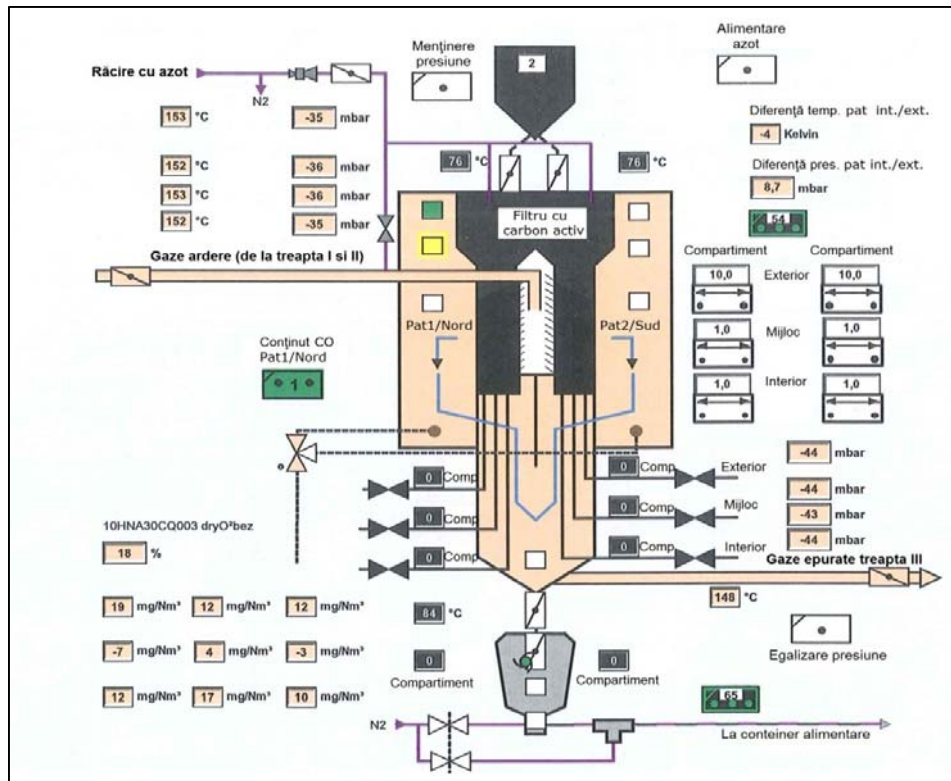


Figura 4.16 – Schemă epurare gaze în filtru cu carbon activ KRV Arnoldstein [69]

Figura 4.16 reprezintă schema de monitorizare și control epurării gazelor în treapta III preluată „on-site” din camera de comandă a unității de incinerare studiate. Constructiv, pereții filtrului sunt divizați în 3 compartimente separate, umplute cu cărbune activ. Cele trei compartimente, au formă cilindrică, fiind divizate

în două părți (Part1/Nord respectiv Part2/Sud), pentru o funcționare secvențială. Capacitatea totală a patului filtrant (cărbune activ) conținută în cele trei compartimente este de 40 tone.

Straturile filtrante aferente fiecărui compartiment au grosimi diferite, astfel stratul interior și cel din mijloc au grosimi egale fiind mult mai subțiri față de stratul exterior; motivul este dat de faptul că în primele două straturi sunt reținute și particulele de praf foarte fine, care încarcă patul filtrant consumându-l mult mai repede. Prin urmare primele două straturi reprezintă straturile de uzură ale mediului filtrant care protejează ultimul strat filtrant din exterior. Acest principiu duce la reducerea semnificativă a consumului de cărbune activ. Neutralizarea cărbunelui uzat se face prin incinerare în camera de ardere a deșeurilor.

Ca flux curgere, gazele epurate în treapta I și II sunt trecute prin mediul filtrant cu cărbune activ din interior spre exterior, parcurgând succesiv cele trei straturi cu material adsorbant. Prin diferența de presiune interior/exterior pat filtrant se poate determina uzura prin încărcare cu particule toxice a stratelor filtrante.

Datorită temperaturii ridicate a gazelor de ardere (140-160°C), există riscul apariției „punctelor fierbiniți” în masa patului filtrant, care reprezintă de fapt autoaprinderea locală a cărbunelui activ. Pentru eliminarea acestor „puncte fierbiniți” se utilizează răcirea cu azot lichid, care se trece prin masa patului filtrant din compartimentul/compartimentele în care a fost identificat. Punctul fierbinte se elimină prin golirea/umplere controlată a patului filtrant din compartimentul respectiv. Răcirea cu azot este utilizată pentru a împiedică extinderea arderii în întreaga masă filtrantă.

Treapta IV– se desfășoară într-un sistem de denoxare catalitică ce utilizează amoniacul (NH_3) ca substanță de neutralizare a noxelor din gaze. Modul de funcționare al sistemului de denoxare studiat este prezentat în figura de mai jos:

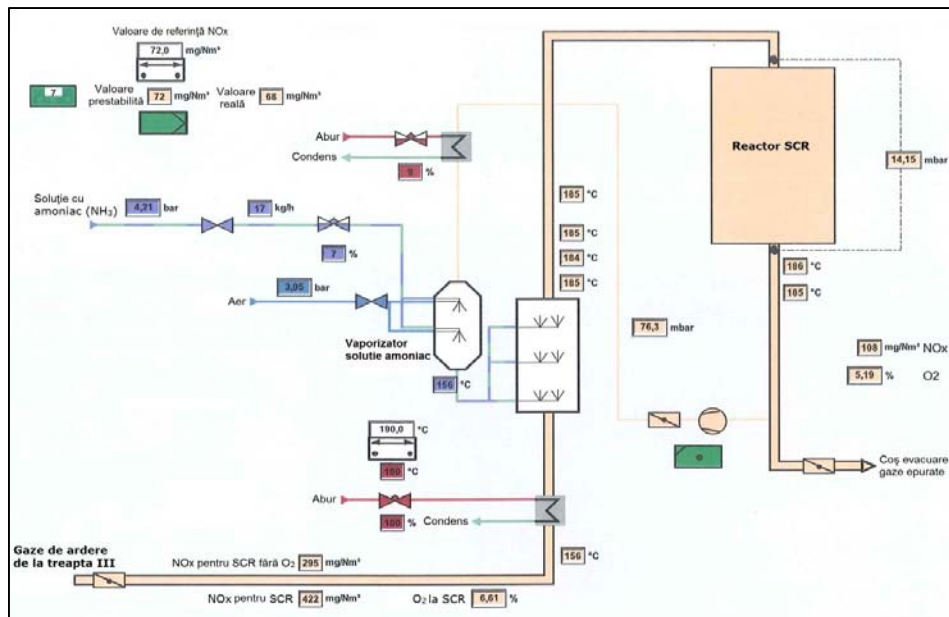


Figura 4.17 – Schemă epurare gaze în SCR – KRV Arnoldstein [69]

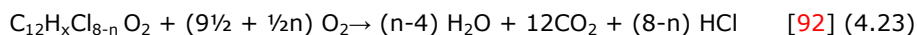
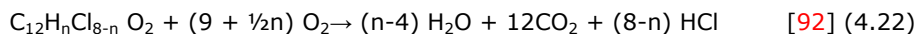
Figura 4.17 reprezintă schema de monitorizare și control epurării gazelor în treapta IV – denoxare catalitică preluată „on-site” din camera de comandă a unității de incinerare studiate. Sistemele de denoxare catalitică neutralizează doar oxizi de azot (NO_x), dioxinele și furanii (PCDD/F) în stare gazoasă, astfel eliminarea particulelor solide foarte fine din fluxul gazelor tratate are un rol important în eficiența de curățire a acelor sisteme de epurare.

Reacțiile chimice de neutralizare, prin descompunerea elementară a oxizilor de azot (NO_x) în azot (N₂) și vapori de apă (H₂O) sunt:

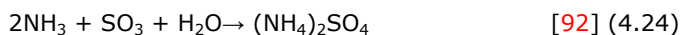


Pentru eficiență de denoxare de peste 90% este foarte important ca, cantitatea de amoniac (NH₃) să fie suficientă, suprafața de contact între gaze și soluția de amoniac să fie cât mai mare și temperatura de reacție să fie peste 170°C. Prin urmare este necesară o preîncălzire a gazelor de ardere epurate la ieșirea din treapta III de epurare, de la 140-160°C la 185°C, prin intermediul unui schimbător de căldură gaze/abur. Pentru atingerea acestui prag de temperatură trebuie avută în vedere și căldura consumată în vaporizatorul de amoniac (NH₃) care are rolul de forma un amestec gaze/soluție amoniac cât mai omogen.

Reacțiile chimice de descompunere a dioxinelor și furanilor (PCDD/F) din stare gazoasă în compuși mai simpli cu impact net redus asupra mediului ambiant sunt:



Eficiența descompunerii dioxinelor și furanilor în acest sistem este între 90-95%. În cazul unor concentrații ridicate de SO₃ în gazele de ardere, această eficiență nu mai poate fi atinsă, datorită formării sulfaților de amoniu ((NH₄)₂SO₄) și a sulfaților de hidrogenați de amoniu (NH₄HSO₄), care colmatează suprafața materialului catalizator din reactorul de catalizare, micșorând capacitatea de epurare a acestuia. Reacțiile chimice de formare a acestor compuși sunt:



Temperatura de condensare a sulfaților hidrogenați de amoniu (NH₄HSO₄), stabilește temperatura de lucru a catalizatorului, astfel pentru o concentrație de SO₃ în gazele de ardere de 0.5 mg/m_N³, temperatura de condensare este sub 200°C; iar pentru 20 mg/m_N³, temperatura de condensare este peste 280°C [92].

Pe lângă aspectele enumerate mai sus, legate de performanța de epurare, un factor important în procesul de epurare îl constituie materialul catalizator care compune masa filtrantă din reactor. Sistemele SCR de performanță ridicată, ca și cel din studiul de caz abordat, utilizează sisteme catalitice „Heneycombed”, care au o structură în formă de fagure și sunt confecționate din materiale cu oxid de titan (TiO) ca substrat de activare catalitică, și materiale cu pentoxid de vanadiu (V₂O₅)

82 Tratarea termică a deșeurilor menajere prin incinerare- 4

și trioxid de wolfram (WO_3) ca și elemente principale de catalizare. Modul de aranjare și construcție a patului catalizator urmărește atingerea următoarelor obiective [92]:

- Difuzia moleculelor de oxizi de azot (NO_x) și amoniac (NH_3) prin masa materialului catalizator. Straturile catalizatoare au rolul de a lamina fluxul de gaze ce le străbate, astfel încât să se asigure un contact maxim între gaze și patul filtrant;
- Difuzia prin porii materialului catalizator;
- Adsorpția NO_x și NH_3 în masa de material filtrant;
- Inițierea și maximizarea reacțiilor chimice de descompunere catalitică;
- Desorpția N_2 și H_2O rezultate în urma reacțiilor chimice;
- Difuzia N_2 și H_2O prin masa suprafeței catalizatoare;
- Difuzia N_2 și H_2O în fluxul de gaze după catalizare (treapta IV epurare).

Principalul factor de monitorizare în operare a unui sistem de epurare SCR este dat de variația consumului de NH_3 , care crește odată cu uzura (consumul) prin diminuare proprietăților catalizatoare a materialului catalizator. Potrivit producătorilor de materiale catalizatoare „Honeycombed”, acestea au o suprafață activă de $750 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ [92].

Fluxul tehnologic de epurare a gazelor de ardere provenite din incinerarea deșeurilor menajere, în patru trepte asigură un grad de curățire al gazelor de ardere de 99.99% [68, 69, 70]. Potrivit datelor puse la dispoziție de unitatea de incinerare de la KRV Arnoldstein, emisiile la coș sunt:

Tabelul 4.2 – Valorile emisiilor în atmosferă la unitatea de incinerare KRV [68]

Valori medii la interval de 30 minute			
Cloruri	HCl	7	mg/Nm^3
Fluoruri	HF	0.3	mg/Nm^3
Dioxid de sulf	SO_2	20	mg/Nm^3
NO_x , echivalent ca dioxid de azot	NO_2	70	mg/Nm^3
Amoniac	NH_3	10	mg/Nm^3
Monoxid de carbon	CO	35	mg/Nm^3
Particule fine în suspensie	---	5	mg/Nm^3
Mercur	Hg	0.02	mg/Nm^3
Carbon organic	C_{org}	5	mg/Nm^3
Valori medii pentru intervale de 30 min – 8 h			
Plumb, Zinc, Chrome	Pb, Zn, Cr	0.1	mg/Nm^3
Arsen, Cobalt, Nichel	As, Co, Ni	0.1	mg/Nm^3
Cadmiu	Cd	0.01	mg/Nm^3
Cadmiu and Taliu	Cd, Tl	0.05	mg/Nm^3
Stibiu, Arsen, Plumb, Crom, Cobalt, Cupru, Mangan, Nichel, Vanadiu, Staniu	Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	0.5	mg/Nm^3
Valori medii pentru intervale de 3-16 h			
Dioxine/Furani	PCDD/PCDF	0.1	ngTE/Nm^3
Toate valorile concentrațiilor prezentate în table sunt raportate la volumul uscat al gazelor de ardere la temperatură de 0°C , 1013 mbar și 11% O_2 ; valoarea NH_3 este pentru 0 vol.% O_2			

4.5.3 Eficiența energetică a incineratorului

Calculul eficienței energetice a unității de incinerare a deșeurilor menajere reflectă gradul de exploatare energetică a fracției combustibile conținută în masa deșeurilor. Având în vedere caracterul eterogen al deșeurilor menajere tehnologia de incinerare aplicată trebuie să asigure atât eficiență economică cât și limitele de poluare impuse de legislația în vigoare, astfel cele două aspecte sunt decisive în luarea deciziei de implementare a unui proiect de tratare termică prin incinerare.

După cum am prezentat în capitolele anterioare (vezi cap.2.2.2), modul de calcul a performanței valorificării energetice ale unei unități de incinerare, acceptat de UE sunt cuantificate prin calculul următorilor indicatori:

- Puterea calorifică netă NCV (Net Calorific Value),
- Eficiența incineratorului Pl_{efr} ,
- Eficiența energetică a incineratorului R1.

Calculul indicatorilor enumerați mai sus se realizează pe baza bilanțurilor masice și energetice aferente unității de incinerare raportate la cantitatea de deșeu incinerat într-o perioadă de timp determinată (de regulă un an). Conform datelor primite de la unitatea de incinerare KRV Arnoldstein, bilanțurile masice și energetice raportate la o cantitate de 90 743t/an deșeu incinerat, pentru anul 2013 raportat la orele de funcționare, acestea sunt:

Tabelul 4.3 –Bilanțurile masice și energetice de la incineratorul KRV Arnoldstein[68]

Bilanț masic intrări	
Deșeuri menajere incinerate	12 t/h
Aer	31.000 m ³ /h
Apă de proces	5 m ³ /h
Hidroxid de calciu (Ca(OH) ₂)	150-300 kg/h
Cărbune activ	3 – 8 kg/h
Soluție de amoniac (NH ₃) (25%)	15 – 25 kg/h
Azot (N)	6 Nm ³ /h
Sare industrială (NaCl)	0.75 kg/h
Bilanț masic ieșiri	
Debit gaze de ardere evacuate la coș	50.000 Nm ³ /h
Metale reciclate (fier vechi)	0.12-0.24 t/h
Zgură	2.4-3.6 t/h
Reziduu unitate tratare gaze de ardere	0.4-0.6 t/h
Apă reziduală	1.5 m ³ /h
Producție energetică / abur, agent termic, energie electrică	
Energie termică produsă (din deșeu)	33.33 MW _{th}
	120 GJ/h
Parametrii abur (la intrare în turbină)	40 t/h, 39 bar, 397 °C
Termoficare	Până la 9 MW _{th}
Abur tehnologic utilizat	Până la to 13.0 t/h
Energie electrică (netă)	Până la 6 MW _{el}

84 Tratarea termică a deșeurilor menajere prin incinerare- 4

Pe baza datelor prezentate în tabelul 4.3 și a informațiilor preluate „on-site”, pentru calculul puterii calorifice nete NCV s-a întocmit următorul breviar de calcul:

Tabelul 4.4 – Breviar calcul NCV la incineratorul KRV Arnoldstein

Breviar de calcul putere calorifică netă NCV (an referință 2013)			
Incinerator: KRV Arnoldstein			
Combustibil: deșeuri menajere în amestec			
DATE DE INTRARE	Simbol	Valoare	U.M
Cantitate totală de deșeuri incinerate	m=	90743	t/an
Cantitatea de combustibil auxiliar	m _f =	88	t/an
Parametrii combustibil auxiliar (ulei)			
- temperatura de utilizare la ardere	t _f =	40	°C
- puterea calorifică inferioară netă (la 40°C)	c _f =	43.142	MJ/kg
Cantitatea totală de abur produsă într-un an	m _{stx} =	277110	t/an
Entalpia netă a aburului	c _{stx} =	2.64225	MJ/kg
Parametrii abur produs			
- presiune	p _{st} =	39	bar
- temperatură	t _{st} =	397	°C
- entalpie	c _{st} =	3.20725	GJ/t
Parametrii apă alimentare cazan			
- presiune	p _{bw} =	65	bar
- temperatură	t _{bw} =	135	°C
- entalpie	c _{bw} =	0.572	GJ/t
Temperatura gazelor de ardere la ieșirea din generatorul de abur pentru O ₂ = 6%	T _b =	215	°C
Conținutul specific de energie în gazele de ardere	c _{pg} =	0.008	GJ/t°C
Eficiența schimbului de căldură aferentă generatorului de abur	η _b =	0.8	-
VALORI CALCULATE	Simbol	Valoare	U.M
Cantitatea de abur produsă prin arderea deșeurilor:			
$m_{st\ w} = m_{st\ x} - [m_f \times (c_f / c_{st\ x}) \times \eta_b]$	m _{stw} =	275957.5	t/an
Puterea calorifică netă NCV a deșeurilor:			
$NCV = (1.133 \times (m_{st\ w} / m) \times c_{st\ x} + 0.008 \times T_b) / 1.085$	NCV=	9.9538	GJ/t
	NCV=	2.7652	MWh/t

Breviarul de calcul este întocmit conform metodei de calcul NCV detaliată în standardul european EN 1295-15, principiul de bază al metodei constă în utilizarea bilanțului energetic al focarului (sistemului de incinerare) și al generatorului de abur, fiind considerate împreună ca un calorimetru.

4.5 - Studiul de caz 3 – Incineratorul KRV Arnoldstein Austria 85

Valorile de referință NCV calculate pentru 50 de incineratoare de deșeuri menajere din Europa, sunt sintetizate în tabelul de mai jos:

Tabelul 4.5 – Valorile NCV calculate pentru 50 de incineratoare MSWI investigate [1]

NCV	Valoare minimă	Valoare medie	Valoare maximă
MJ/kg	8	10.4	12.6
MWh/tonă	2.2	2.9	3.5

Valorile prezentate în tabelul anterior sunt puternic influențate de puterea calorifică a combustibilului incinerat, astfel valorile maxime au fost obținute pentru incineratoarele care ard deșeuri menajere în amestec cu alte deșeuri asimilate în categorie, care ridică semnificativ valoarea puterii calorifice a masei de deșeu incinerat. Astfel pentru a sublinia și evidenția valoarea NCV pentru masa de deșeu incinerată funcție tipul de deșeu incinerat, tabelul 4.6 prezintă următoarele valori:

Tabelul 4.6 – Valorile de referință NCV funcție de tipul deșeurilor [1]

Tip deșeu	Descriere	NCV conținut în substanță*	
		Interval GJ/t	Media GJ/t
Deșeuri municipale în amestec (MSW)	Deșeuri menajere produse de locuințe casnice în amestec (nesortate)	6.3-10.5	9
Deșeuri grosiere	Ex.: mobilă, masă lemnoasă etc.	10.5-16.8	13
Deșeuri similare cu MSW	Deșeuri orașenești (magazine, clădiri de birouri etc.)	7.6-12.6	11
Reziduuri rezultate după procesul de reciclare MSW	Materia rezultată în urma procesului de compostare	6.3-11.5	10
Deșeuri din comerț	MSW colectate separat	10-15	12.5
Deșeuri ambalaje	Ambalaje colectate separat	17-25	20
Combustibili derivați	RDF	11-26	18
Produse industriale specifice	Ex.: hârtie, materiale textile, etc.	18-23	20

*NCV – calculat cu conținutul de umiditate inclus

Având în vedere că incineratorul studiat utilizează peste 90 % din deșeuri municipale în amestec, care conform datelor prezentate în tabel au valori NCV între 6.3-10.5, iar restul de 10% reprezintă deșeuri grosiere, cu NCV 10.5-16.38; valoarea calculată $NCV=9.953$ GJ/t reflectă un grad ridicat de valorificare energetică a conținutului energetic ce caracterizează deșeurile menajere în amestec incinerate.

Astfel am ajuns la concluzia că fulxul tehnologic de incinerare aplicat la unitatea de incinerare studiată este foarte eficient sub aspectul eficienței arderii și a capacității de recuperare energetică dat prin valoarea NCV calculată, ceea ce propulsează unitatea de incinerare KRV Arnoldstein la un nivel „state-of-the-art”. Pe baza datelor prezentate în tabelul 4.3 și a informațiilor preluate „on-site”, pentru calculul eficienței incineratorului Pl_{ef} s-a întocmit următorul breviar de calcul:

Tabelul 4.7 – Breviar calcul Pl_{ef} la incineratorul de deșuri KRV Arnoldstein

Breviar de calcul pentru eficiența incineratorului Pl_{ef} (an referință 2013)			
Incinerator: KRV Arnoldstein			
Combustibil: deșuri menajere în amestec			
DATE DE INTRARE	Simbol	Valoare	U.M
Cantitate totală de deșuri incinerate	$m=$	90743	t/an
Cantitatea de combustibil auxiliar	$m_f=$	44	t/an
Energia totala exportata din sistem	$Q_{exp}=$	240588	GJ/h
Energia importată în sistem	$E_{imp}=$	4921	GJ/an
Energia recirculată (produsă dar utilizată în sistem)	$E_{circ}=$	65414	GJ/an
Parametrii combustibil auxiliar (ulei)			
- temperatura de utilizare la ardere	$t_f=$	40	°C
- puterea calorifică inferioară netă (la 40°C)	$c_f=$	43.142	GJ/t
VALORI CALCULATE	Simbol	Valoare	U.M
Energia introdusă în proces prin arderea combustibilului auxiliar: $E_f=m_f \times c_f$	$E_f=$	1898	GJ/an
Eficiența unității de incinerare			
$Pl_{ef}=[Q_{exp}-(E_f+E_{imp})]/(E_f+E_{imp}+E_{circ})$	$Pl_{ef}=$	3.23	[-]

Metoda de calcul utilizată în breviarul de calcul întocmit mai sus este conform BAT on Waste Incineration [1]. Valorile de referință a indicativului Pl_{ef} date în documentația de specialitate pusă la dispoziție de Comisia Europeană pentru incineratoarele de deșuri menajere sunt:

Tabelul 4.8 – Valorile Pl_{ef} calculate pentru 73 de incineratoare MSWI investigate [1]

Valorificare energetică	Nr. de unități investigate	Valoare minimă	Valoare medie	Valoare maximă
CHP Pl_{efCHP}	50	0.6	2.0	7.1
Electrică	8	0.6	1.2	1.6
Termică	15	1.0	2.8	7.1

*Valorile pot fi comparate doar cu unități de incinerare care ard deșuri cu putere calorifică apropiată

Prin analiza valorilor Pl_{ef} din tebele 4.7 respectiv 4.8, putem concluziona că valoarea obținută $Pl_{ef}=3.23$ situează incineratorul peste media unităților de incinerare similare din EU. Datorită faptului că formula de calcul nu ține cont de puterea calorifică netă (NCV) a deșeurilor incinerate, valoarea Pl_{ef} poate fi utilizată doar în cazul incineratoarelor ce ard deșuri similare.

Indicatorul ce ține cont și de puterea calorifică (NCV) a deșeurilor incinerate este R1, indicatorul de eficiență energetică, care este obligatoriu să fie determinat pentru toate unitățile de incinerare din UE. Calculul eficienței energetice a incineratorului intră în obligația deținătorului unei astfel de unități, sub supravegherea personalului autorizat în acest scop.

Conform Directivei Europene 2008/98/EC ON WASTE [15], eficiența energetică a unei unități de incinerare este dată de valoarea indicativului R1. În acest sens am întocmit următorul breviar de calcul:

Tabelul 4.9 – Breviar calcul R1 pentru incineratorul de deșeuri KRV Arnoldstein

Breviar de calcul pentru eficiența energetică a incineratorului R1 (an referință 2013)			
Incinerator: KRV Arnoldstein			
Combustibil: deșeuri menajere în amestec			
DATE DE INTRARE	Simbol	Valoare	U.M
Cantitate totală de deșeuri incinerate	m=	90743	t/an
Număr de ore de funcționare	n=	8057	ore
Puterea calorifică netă calculată NCV	NCV=	9953	kJ/kg
Energia electrică consumată în proces	$E_{p_{el.int.used}}$ =	50172	MWh/an
Energia electrică exportată (vândută)	$E_{p_{el.export}}$ =	41853	MWh/an
Energia termică consumată în proces	$E_{p_{heat int. used}}$ =	3852	MWh/an
Energia termică exportată (vândută)	$E_{p_{heat export}}$ =	24977	MWh/an
Energia importată anual (exclue E_w și E_f)	E_i =	1367	MWh/an
Parametrii combustibil auxiliar (ulei)			
- cantitatea de combustibil auxiliar	m_f =	44	t/an
- temperatura de utilizare la ardere	t_f =	40	°C
- puterea calorifică inferioară netă (la 40°C)	c_f =	43142	kJ/kg
VALORI CALCULATE	Simbol	Valoare	U.M
Energia introdusă în proces prin arderea combustibilului auxiliar: $E_f = m_f \times c_f$	E_f =	527	MWh/an
Energia anuală conținută în masa deșeurilor incinerate: $E_w = m \times NCV$	E_w =	250880	MWh/an
Energia totală produsă anual: $E_p = 2.6 \times (E_{p_{el.int.used}} + E_{p_{el.export}}) + 1.1 \times (E_{p_{heat int. used}} + E_{p_{heat export}})$	E_p =	177759	MWh/an
Eficiența unității de incinerare			
$R1 = [E_p - (E_f + E_i)] / [0.97 \times (E_w + E_f)]$	R1=	0.7212	[-]

După cum se observă din tabelul 4.9, pe baza valorilor și semnificației parametrilor ce intră în calculul indicatorului R1, am concluzionat că acesta cuantifică capacitatea de unității de incinerare de a exploata/valorifica energetic masa de deșeu incinerat.

Concluzia are la bază faptul că indicatorul R1 cuprinde întreagă energie, atât electrică cât și termică, care poate fi extrasă din deșeu. Valoarea $R1=0.7212$ indică un grad ridicat de valorificare energetică a unității de incinerare (valoarea $R1=1.0$ indică faptul că deșeul este valorificat energetic 100%). În Anexa 1 sunt prezentate valorile indicatorului R1 pentru un interval de 5 ani (2009-2014) de funcționare a unității de incinerare KRV Arnoldstein.

4.6. Studiu de caz 4 - incineratorul pentru deșeuri menajere din Timișoara

Studiul de caz abordat are la bază datele tehnice și informațiile preluate din studiul de fezabilitate și oferta tehnică acceptate de către autoritățile Municipiului Timișoara care au avut în responsabilitate proiectul de eliminare și valorificare energetică a deșeurilor menajere bazate pe strategia „zero deșeuri” [2, 103].

4.6.1 Inițierea proiectului de incinerare a deșeurilor menajere

Conform HG 343/2005 începând cu 01.01.2009 depozitul de la Parța-Șag a fost închis și ca urmare Consiliul Local Timișoara a fost nevoit să-și reconsidere strategia în ce privește eliminarea finală a deșeurilor, lucru impus de legislația europeană prin Directiva Nr.33/2003/EEC. În acest context Consiliul Local și executivul au fost nevoiți să-și schimbe politica și atunci s-a stabilit ca strategia să fie „zero deșeuri”.

Ca urmare, în anul 2009, Primăria Timișoara, S.C. Retim Ecologic Service S.A. și S.C. COLTERM S.A. au analizat modalitățile de eliminare a deșeurilor și valorificarea energetică a acestora pe termen lung prin producerea de energie electrică și termică într-un grup de cogenerare [103].

Prin punerea în funcție a stației de sortare S.C. Retim S.A. obține un combustibil alternativ (RDF) care în prezent este valorificat energetic la fabricile de ciment din țară. Această stație tratează doar o parte din fluxul deșeurilor menajere produse, pentru fracția biodegradabilă a deșeurilor menajere se va investi într-o instalație care va produce biogaz utilizat apoi într-o instalație de cogenerare de mică putere cu motoare termice ce va produce energie pentru necesitățile proprii. O parte din biogazul rezultat și biocoalul rezultat din fermentare se va utiliza ca și combustibil secundar în unitatea de incinerare a deșeurilor care se va construi, și ca atare cantitatea finală de combustibil provenit din deșeuri este de 78.500 tone/an [103].

Ca urmare cele trei entități menționate mai sus au decis înființarea unei societăți private „International Recycling Energy” care să dezvolte acest proiect. Consiliul Local al Municipiului Timișoara a aprobat înființarea acestei societăți prin HCL nr.302/27.09.2011 lucru care s-a concretizat în 18.01.2012 societatea primind certificatul de înregistrare. Societatea este compusă din trei acționari: Raroma Service A.G Elveția cu 49%, Consiliul Local Timișoara cu 31% și S.C COLTERM S.A cu 20 % [103].

După analiza diverselor scenarii prin documentația de atribuire în ceea ce privește obținerea obiectivelor proiectului și anume, eliminarea deșeurilor prin valorificarea energetică a combustibilului alternativ obținut din acestea și reducerea consumului de gaz, s-a recomandat ca soluție optimă, care să fie detaliată de ofertanți, cu următoarele echipare:

- Instalație de ardere în masă pe grătare mobile a 9,375 tone/h combustibil alternativ și 1,310 t/h biocoal,
- Cazan de abur de cu parametrii orientativi de 37 t/h, 45 bar și 430°C cu o instalație de epurare gaze de ardere,
- Turbină cu abur în condensatie și priză, cu o putere de min. 5,5 MWe și o putere termică la priză de min.14 MWt.
- Generator cu putere 7,5 MVA (adaptat la parametrii turbinei mai sus menționate).

Ca valoare de investiție implementarea proiectului de tratare termică a deșeurilor menajere prin incinerare va costa 66 mil. euro. Societatea comercială va produce

energie electrică pe care o va vinde pe piața de energie electrică și energie termică pe care o va livra la S.C. COLTERM S.A..Centrala electrică/incineratorul va fi situată în incinta CET Sud Timișoara pe amplasamentul pus la dispoziție de autoritatea contractantă pe o suprafață aproximativă de 7800 mp. Alimentarea cu combustibil se va face din stația de sortare de pe Calea Sagului din vecinătatea CET Sud, iar energia electrică se va livra în stația electrică din CET Sud în Sistemul Energetic Național (S.E.N). Instalația se va încadra în normele europene în ceea ce privește emisiile de noxe, asigurându-se în același timp și eliminarea zgurii și cenușii uscate.

Proiectul urmărește de fapt două obiective:

- Eliminarea deșeurilor sortate prin valorificarea energetică a combustibilului alternativ rezultat din acestea, printr-o instalație de cogenerare de înaltă eficiență.
- Reducerea consumului de gaz metan, prin înlocuirea acestuia cu acest combustibil alternativ, rezultatul fiind de aproximativ 16 milioane m³/an.

4.6.2 Premizele de dimensionare a instalației de incinerare deșuri

Premizele de dimensionare a instalației de incinerare a deșeurilor menajere din Timișoara au pornit de la strategia „zero deșuri” demarată de autoritățile locale în domeniu, prin care se propune realizarea unei instalații de incinerare a deșeurilor menajere și producerea energiei electrice și termice într-un grup turbogenerator în condensatie cu prize de abur [103].

Unitatea de incinerare proiectată trebuie să valorifice energetic cantitatea de 9,35 tone/h de combustibil rezultat din deșeurile menajere și 1,31 t/h biocoal rezultat din fermentarea fracției biodegradabile, într-o instalație de cogenerare de înaltă eficiență formată dintr-un cazan, care va produce cca.40 t/h abur cu presiunea de 42 bar și temperatura de 430°C și un turbogenerator de cca.7 MWe cu condensatie și prize reglabile la 3,5 bar respectiv 0,8 bar.

Din priza reglabilă de 3,5 bar se livrează cca. 21 t/h abur (în regim de funcționare iarna) și cca. 5 t/h în regim de funcționare vara, iar din priza de 0,8 bar se livrează cca. 17 t/h în regim de funcționare iarna și cca. 32 t/h în regim de funcționare vara, pentru prepararea a 21 MWt (18 Gcal/h) apă fierbinte necesară în sistemul de termoficare [103].

Caracteristicile combustibililor care au stat la baza dimensionării instalației de incinerare a deșeurilor sunt constituite din formarea unui amestec mixt între deșuri menajere sortate (combustibil principal) și biocoal (combustibil secundar), din care proporția de combustibil secundar să nu depășească 10 % masic din cantitatea totală de combustibil. Compoziția chimică elementară de calcul a celor două tipuri de combustibili sunt:

- *Combustibil principal:*
-compoziție chimică elementară (% masice):
 $25.31c+3.6h+0.77n+16.59o+0.12s+0.43cl+0.01f+38h_2o+15.17a=100\%$
- *putere calorifică inferioară de calcul: 10800 kJ/kg.*
- *Combustibil secundar:*
- compoziție chimică elementară (% masice):
 $45.34+3.88h+0.72n+14.78o+1.28s+15h_2o+19a=100\%$
- *putere calorifică inferioară de calcul: 17650 kJ/kg.*

90 Tratarea termică a deșeurilor menajere prin incinerare- 4

Caracteristicile combustibilului mixt care au stat la baza dimensionării instalației de incinerare sunt prezentate în tabelul 4.10:

Tabelul 4.10 – Cracteristicile de calcul ale combustibilului mixt [103]

Deșeuri menajere și alte deșeuri similare (*)		Unitate	Dimensionare (**)	Domeniu	Observație
100	Combustibil principal		Mitură din deșeuri menajere și „biocoal”		
110	Capacitate, valoare calorica	-			
111	Capacitate de combustie	MW	34,548	20,73–38,00	
112	Putere calorifică	MJ/kg	11,640	8,5–13,0	
113	Debit masic	Mg/h	10,685	6,7–12,28	
120	Proprietăți mecanice ale combustibilului	-			
121	Fragmentare, granulație - normală	mm	< 300 x 50 x 50		L x B x H
122	Adaosuri în lungime - max. 10 Ma%	mm	< 1.000 x 800 x 800		L x B x H (***)
123	Adaosuri în lungime - max. 5 Ma%	mm	< 1.000 x 70		L x d (***)
124	Folii	mm	< 500 x 500		L x B
125	Benzi	mm	3.000		L
126	Granulație fină < 10 mm	ma% MU	< 15		
127	Granulație fină < 1 mm	ma% MU	< 10		
128	Pulbere < 0,5 mm	ma% MU	< 5		
130	Substanțe grosiere:				
131	Materii străine (sticlă, roci, ceramică ...)	ma% MU	< 15		
132	Metale feroase	ma% MU	< 5		
133	Metale neferoase (Al, ...)	ma% MU	< 1		
134	Sumă fracțiune inertă și de cenușă	ma% MO	15,64	15 - 30	
135	Conținut de apă	ma% MO	35,18	15 - 45	
140	Greutate specifică	kg/m ³	350	200 - 450	
150	Analiza combustibilului				
151	C - Carbon	ma% MO	27,76	18 - 38	
152	H - Hidrogen	ma% MO	3,64	2,6 - 5,6	
153	O - Oxigen	ma% MO	16,37	13 - 21	
154	N - Azot	ma% MO	0,76	0,6 - 1,0	
155	S - Sulf	ma% MO	0,26	0,2 - 0,45	
156	Cl - Clor	ma% MO	0,38	0,3 - 0,8	
157	F - Fluor	ma% MO	0,01	0,0 - 0,05	

MU – masa uscată, MO – masa umedă (în stare brută).
 (*) - conform cu lista UE pentru deșeuri, fără combustibili care necesită monitorizare specială și deșeuri cu mai mult de 1% clor;
 (**) - valori medii ale unei livrări de combustibili (șarje de circa 500 t);
 (***) - sistemul de combustie poate face față acestor dimensiuni, respectiv unora chiar mai mari, în aceste cazuri, nu poate fi garantată combustia integrală (în cazul arderii de ex. trunchiurilor de copac, a cârților telefonice groase, a baloților).

4.6 - Studiul de caz 4 – Incineratorul de la CET Sud Timișoara 91

Premizele menționate în tabelul 4.10 au stat la baza dimensionării unității de incinerare, și s-a calculat diagrama capacității de ardere ce reflectă valorificarea energetică a combustibilului incinerat funcție de debitul și puterea calorifică a combustibilului incinerat, astfel:

Tabelul 4.11 – Parametrii de încărcare a unității de incinerare [103]

Încărcare	Debit combustibil [t/h]	Putere calorifică [MJ/kg]	Sacrină [%]	Energie conținută [MW _{th}]	Capacitate incinerare [t/an]
A	11.160	11.145	100	34.548	89.000
B=DP	10.685	11.640	100	34.548	85.000
C	9.567	13.000	100	34.548	77.000
D	6.696	13.000	70	24.180	54.000
E	6.696	11.145	60	20.729	54.000
F	8.779	8.500	60	20.729	70.000
G	11.160	8.500	76	26.350	89.000
Capacitatea de incinerare fără utilizarea combustibilului secundar (biocoal)					
W1	11.160	9.073	81	28.125	89.000
W2	9.375	10.800	81	28.125	75.000
W3	8.804	11.500	81	28.125	70.000
Capacitatea maximă de incinerare (funcționarea peste aceste limite nu este posibilă)					
A'	12.28	11.14	110	38.003	Pentru o funcționare de 8000 ore/an
B'	11.75	11.64	110	38.003	
C'	10.52	13.00	110	38.003	
G'	12.28	8.50	84	28.985	

Pe baza datelor din tabelul 4.11 s-a efectuat diagrama capacității de incinerare:

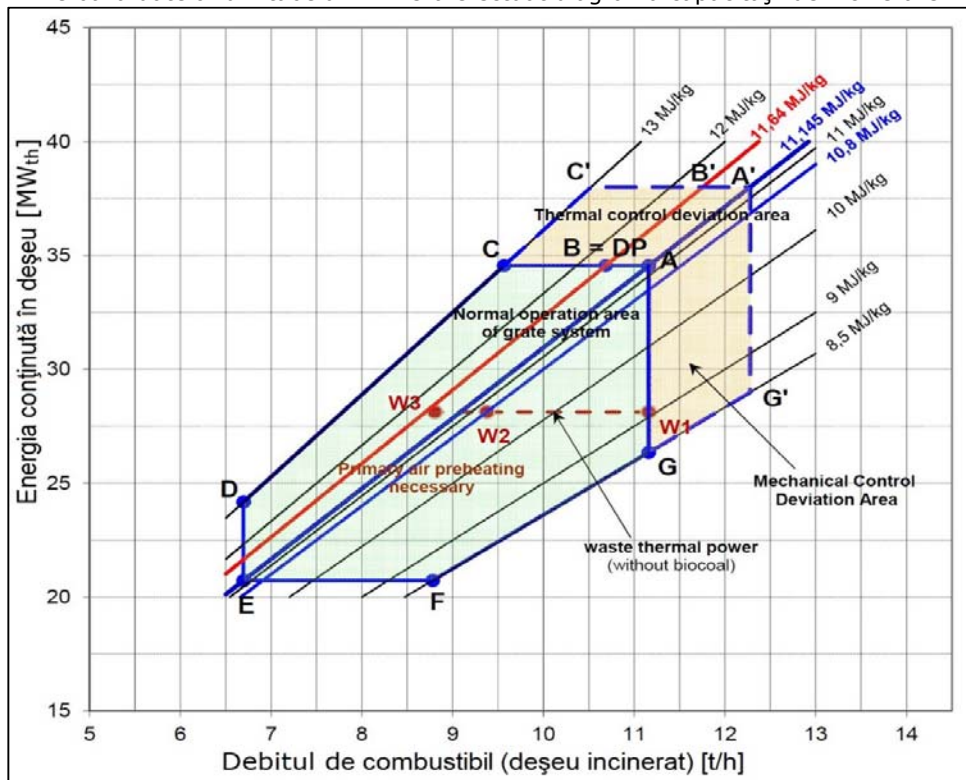


Figura 4.18 Diagrama capacității de incinerare MSWI Timișoara [103]

Diagrama 4.18 reprezintă flexibilitatea unității de incinerare în ce privește capacitatea de incinerare funcție de potențialul energetic al acestora. Diagrama reflectă sarcina minimă și maximă în care poate funcționa unitatea de incinerare, precum și zona tampon de reglare mecanică în cazul unor variații mai mari a debitului și puterii calorifice a deșeurilor incinerate. Atingerea performanțelor energetice exprimate prin diagrama capacității de incinerare depinde de realizarea amestecului omogen între combustibilul principal (deșeuri menajere) și cel secundar (biocoal). Alimentarea exclusivă cu sarje de combustibil secundar (biocoal) este strict interzisă, și poate duce la distrugerea unității de incinerare datorită faptului că acestea au un conținut caloric ridicat.

4.6.3 Descrierea fluxului tehnologic al unității de incinerare

Dimensionarea și proiectarea stației de tratare termică a deșeurilor municipale, conform caietului de sarcini, are la bază utilizarea a doi combustibili: deșeuri menajere sortate și biocoal rezultat în urma procesului de producere a biogazului. Combustibilul principal îl reprezintă deșeurile menajere sortate, iar biocoal-ul va fi maxim 10% din cantitatea totală de combustibil incinerat [103]. Schema de concept care sintetizează fluxul tehnologic aferent unității de incinerare care va fi construit în Municipiul Timișoara este prezentat în figura 4.19:

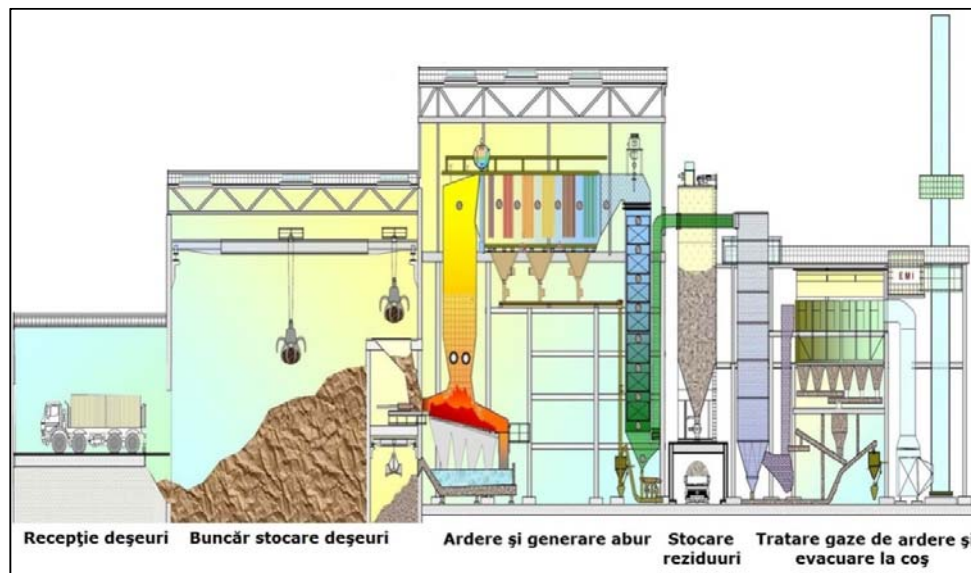


Figura 4.19 – Schema de concept a unității de incinerare MSWI Timișoara [103]

Conform figurii 4.19 părțile componente ale fluxului tehnologic aferente unității de incinerare se împart în patru grupe principale:

1. *Sistemul derecepție, stocare și alimentare deșeuri* – cuprinde două sisteme de preluare deșeuri unul pentru deșeurile menajere care sunt stocate într-un buncăr de beton, și altul pentru biocoal care va fi stocat într-un siloz metalic. Buncărul pentru deșeurile menajere sortate este prevăzut cu macarale graifer, concasor de mărunțire și pâlnie de alimentare deșeuri pe grătarul de incinerare;

iar alimentarea silozului de depozitare biocoal se va face printr-un sistem separat de alimentare alcătuit din transportoare cu melc, mecanism tip elevator cu cupe și transportor cu lanț.

2. *Sistemul de incinerare* – cuprinde grătarul mobil cu mișcare în avans (vezi cap. 4.2). Deșeurile menajere sunt alimentate prin pâlnia aleferntă grătarului, unde are loc uscarea și arderea masei solide și a volatilelor degajate în focar. Pentru eficientizarea procesului de ardere se folosește o recirculare a gazelor de ardere preluate după unitatea de tratare gaze arse.
3. *Sistemul de valorificare energetică* – care cuprinde generatorul de abur și grupul de cogenerare. Aburul este produs într-un generator de abur în concepție „Tail-End” cu circulație naturală în construcție verticală cu pereți membrană și patru trepte de supraîncălzire a aburului. Aburul produs este destinat într-o turbină în condensație prevăzută cu două prize reglabile de abur.
4. *Sistemul de tratare a gazelor de ardere* – utilizează procedeul de denoxare SNCR și cel de tratare prin metoda semi-uscată, practic tratarea gazelor de ardere se desfășoară în 5 etape: denoxare SNCR prin injecție de uree în focar, injecție de hidroxid de calciu în gazele de ardere, activare adsorbție în vaporizator, adsorbție semiuscată în reactor și desprăfuire în filtru cu saci.

4.6.3.1 Sistemul de recepție, stocare și alimentare deșeurii menajere

Datorită faptului că unitatea de incinerare urmează să ardă două tipuri de combustibil cu proprietăți fizico-chimice foarte diferite, sunt necesare două sisteme de recepție și stocare a deșeurilor incinerate.

Sistemul de combustibil de bază – reprezentat de deșeurile menajere sortate, ca și componentă principală este similar cu cel prezentat în studiul de caz 3. Conceptul funcțional al acestui sistem este reprezentat în figura de mai jos:

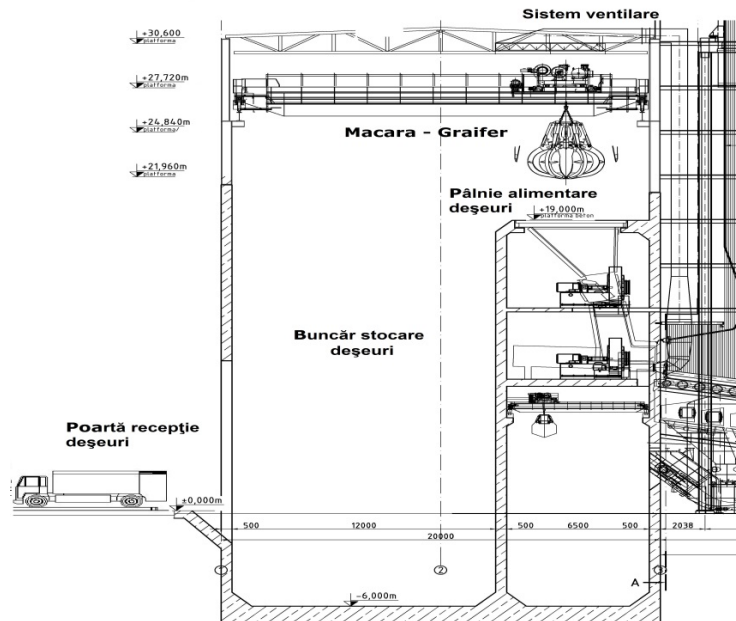


Figura 4.20 – Sistem alimentare deșeurii MSWI Timișoara [103]

Deșeurile preluate de la stația de sortare sunt depozitate în bunkerul de stocare prin intermediul a 4 porți de recepție. Porțile de preluare a deșeurilor aferente bunkerului se deschid doar în momentul alimentării cu deșeuri. Zona de preluare a deșeurilor va fi prevăzută cu un sistem automat de cântărire cu cartelă magnetică prin care vor fi preluate datele de identificare a camionului.

Buncărul are o capacitate de stocare de 5450 m³utili, și este deservit de două macarale pod rulat cu graifer (una în funcțiune, una în rezervă), care au rolul de a manevra deșeurile din zona de deversare, distribuirea acestuia în bunker și alimentarea instalației de ardere.

Ca și în studiul de caz precedent, partea superioară a bunker-ului de stocare este prevăzută cu un sistem de ventilare, care are rol de a crea o depresiune de ordinul milibarilor (mbar) cu scopul de a elimina poluarea cu miros neplăcut a mediului ambiant. Aerul infestat captat din bunker este utilizat ca aer primar de ardere, astfel mirosul și volatilele conținute în aerul infestat sunt neutralizate prin ardere.

Concasorul pentru mărunțirea deșeurilor grosiere, va fi amplasat în interiorul bunkerului la una din jbeaburile de alimentare cu deșeuri, alimentarea acestuia se va face printr-o pâlnie care va face legătura între jbeab și flanșa de alimentare a concasorului.

Sistemul de combustibil secundar – reprezentat de biocoal (compostul rezultat în urma procesului de obținerea a biogazului), va fi stocat într-un siloz etanș, prevăzut cu un sistem de alimentare închis, pentru a preveni emisiile de praf și miros. Datorită inflamabilității ridicate a biocoal-ului silozul metalic va fi prevăzut cu sisteme antiex. Modul de alimentare și amestecare cu deșeurile menajere procesate va fi complet independent procedural și tehnic, față de celelalte sisteme, până la camera de ardere. Sistemul de alimentare va fi alcătuit din transportoare cu melc, mecanism tip elevator cu cupe și transportor cu lanț.

4.6.3.2 Sistemul de incinerare deșeuri menajere

Similar cu cazul precedent sistemul de incinerare este compus din grătarul mobil și focarul generatorului cu abur. În sistemul de ardere pe grătare mobile are loc faza de ardere primară a deșeurilor, fiind caracterizată de uscare, volatilizare și arderea în masă prin combustia carbonului fix; iar în focarul generatorului de abur are loc faza de ardere secundară caracterizată de combustia gazelor și volatilelor cu prag de ardere la temperatură ridicată, generate din prima fază (vezi cap. 4.1). Cele două componente ale sistemului de incinerare funcționează împreună, grătarul mobil fiind integrat în partea inferioară a generatorului de abur.

Sistemul de grătare mobile este unul cu mișcare în avans, alimentarea cu deșeuri fiind prin intermediul pâlniei de alimentare situată în bunkerul de stocare deșeuri. forma geometrică este concepută în așa fel încât să evite colmatarea, și pătrunderea aerului prin masa de deșeu. Pereții pâlniei sunt dubli, răciți cu apă pentru a menține temperatura optimă în limitele de siguranță. Răcirea grătarului are loc prin insuflarea aerului primar de ardere printre grătare. Prin mișcarea grătarelor în avans și modul de introducere a aerului primar de ardere se realizează o afânare eficientă în masa patului de deșeu de pe grătar, astfel se asigură o eficientizare ridicată a arderii complete a particulelor solide (vezi cap. 4.2).

Grătarul mobil este compus pe direcția longitudinală din trei zone cu mișcare independentă, fiecare zonă fiind prevăzută cu un sistem hidraulic propriu, astfel încât viteza grătarului să poată fi adaptată la structura combustibilului. Prin urmare gratarul este divizat în șase zone, fiecare zonă fiind prevăzută cu pâlnie de captare cenușă și fragmente fine de deșeu.

Ca recomandare, prin analiză cu cazul de studiu 3, sinterizare a zgurii și fragmentelor fine de deșeu captate în aceste pâlnii, prin recirculare în camera de ardere, ar duce la vitrificarea zgurii și arderea completă a deșeurilor, astfel se reduce semnificativ conținutul de TOC (Total Organic Carbon) în reziduurile de ardere. Procedul nu implică costuri suplimentare de investiție.

Din punct de vedere al alimentării cu aer necesar arderii, principiul constructiv al grătarului mobil din prezentul studiu de caz este prezentat în figura 4.21.

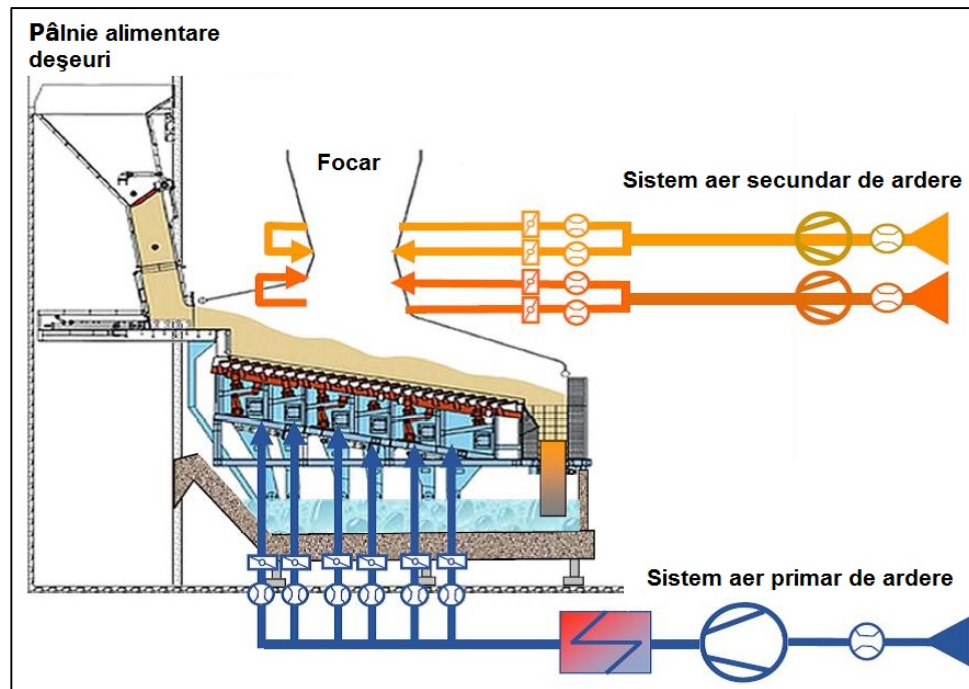


Figura 4.21 – Sistem alimentare aer ardere MSWI Timișoara [103]

Insufierea aerului primar de ardere are loc separat prin cele șase zone de ale grătarului, debitul de aer introdus fiind variabil în funcție de parametrii de reglare a arderii. Aerul primar de ardere este preluat din sistemul de ventilare al bunker-ului de stocare a deșeurilor și din zona de răcire a zgurii de gratar.

Ca și în cazul precedent, introducerea aerului secundar are loc în focar în zona de combustie secundară de ardere a volatilelor și vaporilor greu combustibil generați din faza de ardere primară. Pentru eficientizare energetică are loc și o recirculare a gazelor de ardere, astfel o parte din debitul de aer este preluat dinaintea zonei de evacuare la coș. Restul aerului este preluat din interiorul sălii cazanului (de sub acoperiș). Debitul de aer secundar este reglat în funcție de temperatura din focar și de conținutul de oxigen din gazele de ardere.

Controlul arderii se realizează prin corelarea între mișcarea grătarelor, debitul de aer insuflat și alimentarea cu deșeu. Spre deosebire de cazul de studiu 3, monitorizarea temperaturii de ardere se realizează printr-un sistem de măsurare acustică bazat pe viteza de propagare a sunetului prin mediu gazos. Concret sistemul este compus din mai multe grupuri de emițător/receptor, unde propagarea

unde acustice este generată în emițător cu aer comprimat, și este captată în receptor. Principial modul de măsurare a temperaturii într-un astfel de sistem este prezentat în figura 4.22.

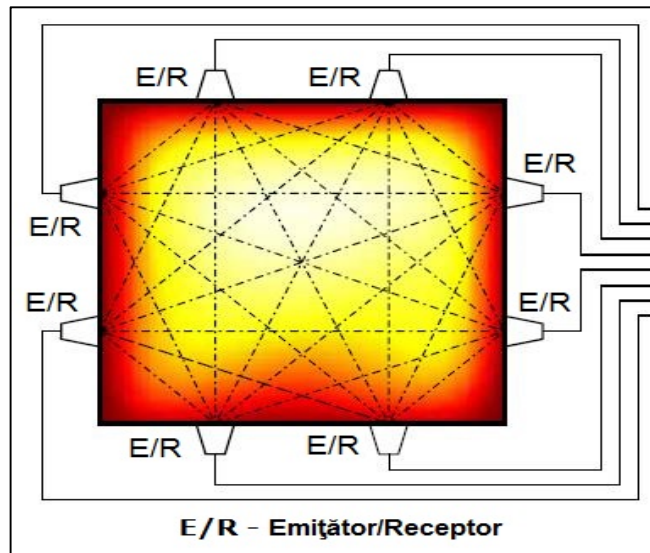


Figura 4.22 – Sistem acustic măsurare temperatură[103]

Spre deosebire de sistemul de monitorizare cu cameră în infraroșu, acest sistem nu are o măsurare directă a temperaturii pe suprafața grătarului, ci doar în zone apropiate de aceasta, astfel măsurarea temperaturii în masa deșeurilor incinerate este una indirectă. Temperatura din focar este menținută în intervalul 850-1100 °C.

4.6.3.3 Sistemul de valorificare energetică

Sistemul de valorificare energetică cuprinde generatorul de abur, o turbină pe abur și schimbătoarele de căldură abur/apă pentru producerea agentului termic de termoficare. Capacitatea energetică instalată a acestui sistem poate să producă un debit de abur de 40 t/h la 42 bar și 430 °C, abur din care se poate produce maxim 7 MWe (regim încărcare 100%) prin grupul turbo-generator și maxim 34.548 MWth (regim încărcare 100%) [103].

Generatorul de abur este proiectat și dimensionat în conformitate standardele și directivele UE în ce privește incinerarea deșeurilor menajere și asimilate cu acestea. Astfel, construcția camerei de ardere, în zona post ardere (focar), menține o temperatură a gazelor de ardere >850 °C și o perioadă de tranziție a gazelor prin această zonă > 2 secunde, în scopul distrugerii poluanților din gazele de ardere (vezi cap.4.1.2). Generatorul de abur este cu circulație naturală, în construcție verticală concept „Tail-End”, această formă constructivă asigură arderea completă și timpul de rezidență suficient pentru arderea volatilelor și vaporilor degajați din faza primară de ardere.

Sistemul de preparare a agentului termic pentru încălzire este legat de sistemul de turbină cu abur, întrucât aburul necesar în acest sens este preluat de pe prizele

de abur aferente turbinei. Schema simplificată a sistemului de valorificare energetică aferent unității de incinerare studiate este prezentat în figura 4.23.

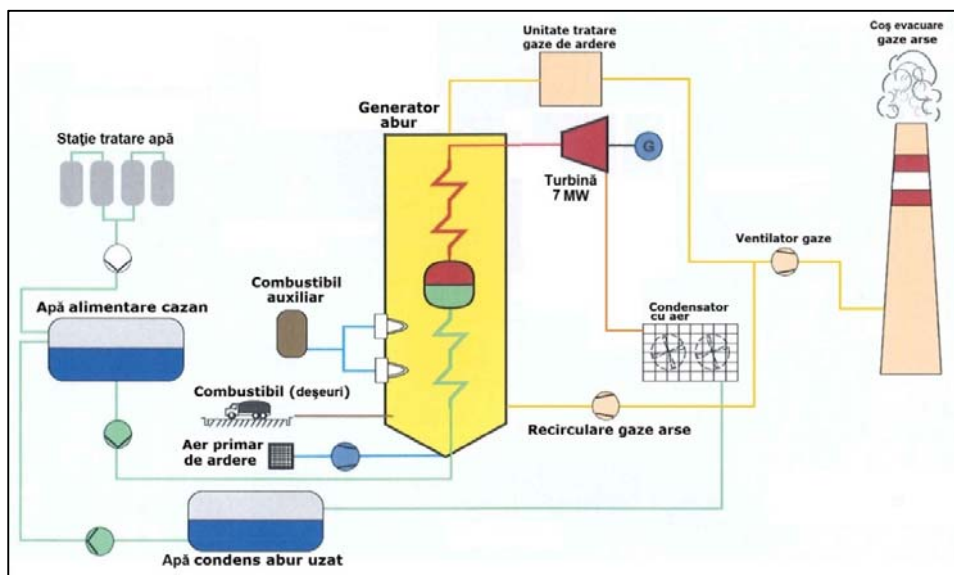


Figura 4.23 – Schema de valorificare energetică MSWI Timișoara

Din punct de vedere funcțional, sistemul de valorificare energetică din prezentul studiu de caz este asemănător cu cel precedent (studiu caz 3) cu mențiunea că aburul este destinat într-o singură turbină, iar parametrii aburului uzat la ieșire din turbină sunt 0.07 bar_a și $39 \text{ }^\circ\text{C}$. Turbina este prevăzută cu două prize de presiune reglabile una la 3.5 bar_a și alta de 0.8 bar_a .

Priza reglabilă de 3.5 bar_a va alimenta următorii consumatori:

- Degazorul pentru prepararea apei de alimentare cazan,
- Schimbătorul de căldură apă/abur (de bază) pentru termoficare,
- Preîncălzitorul de apă de adaos.
- Preîncălzitorul de aer de ardere.

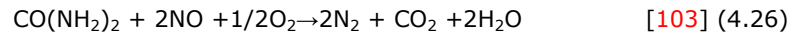
Priza reglabilă de 0.8 bar_a va alimenta următorii consumatori:

- Schimbătorul de căldură apă/abur (de vârf) pentru termoficare,
- Preîncălzitorul de joasă presiune (PJP) pentru încălzirea condensatului principal de la $60 \text{ }^\circ\text{C}$ la $90 \text{ }^\circ\text{C}$, înainte de intrarea în degazorul termic.

4.6.3.4 Sistemul de tratare gaze de ardere

Sistemul de tratare al gazelor de ardere cuprinde cinci trepte de curățire a gazelor de ardere. Spre deosebire de cazul precedent, metoda de tratare a gazelor de ardere implementată este prin procedeul semi-uscat și reducerea noxelor prin procedeul non-catalitic (SNCR – Sistem of Non Catalytical Reduction). Astfel fluxul tehnologic de tratare a gazelor implementat are o altă ordine de procesare a debitului de gaze de ardere spre deosebire cel prezentat în studiul de caz 3.

În treapta I–are loc faza de reducere a emisiilor de NO_x, prin injecția unui soluții de uree direct în camera de ardere (focar), unde se produce descompunerea oxizilor NO_x în compuși mai simpli. Ecuația care stă la baza procesului este:



Reacția are loc aproape în întregime datorita temperaturii ridicate a gazelor de ardere 850–1100 °C. Temperatura la care se face injecția de uree joacă un rol important în eficiența sistemului SNCR, dependența între temperatură și capacitatea de reducere a NO_x este prezentată în figura 4.24.

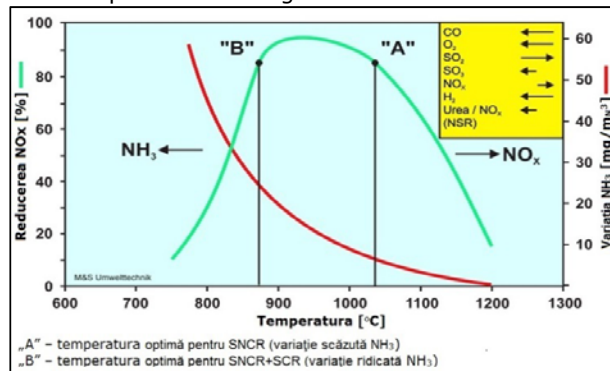


Figura 4.24 – Variația reducerii NO_x funcție de temperatură [103]

Din figura 4.24 se observă intervalul că optim de temperatură pentru reacția chimică de reducere NO_x este între 870–1050 °C.

Fluxul tehnologic de tratare al gazelor de ardere după generatorul de abur este sintetizat în figura 4.25.

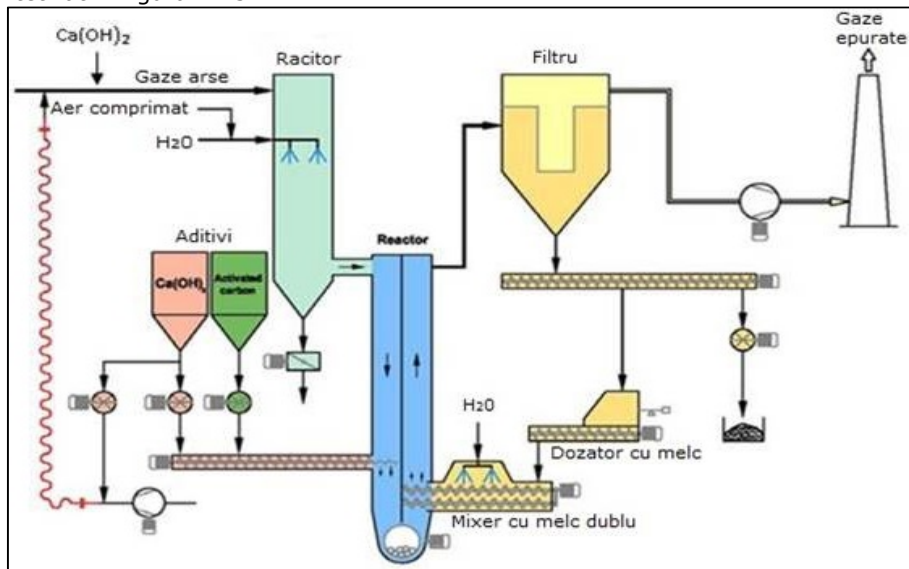


Figura 4.25 – Tratarea gazelor de ardere MSWI Timișoara [103]

Conform figurii 4.25, gazele de ardere trec consecutiv prin zona de injecție de hidroxid de calciu, vaporizator, reactor și filtru cu saci. Vehicularea gazelor este realizată de ventilatorul situat după filtrul cu saci, astfel se crează o depresiune în amonte care prevenind eventualele scăpări de gaze prin neetanșeități.

În Treapta II – are loc injecția de hidroxid de calciu (Ca(OH)_2) în fluxul de gaze arse în canalele de gaze din amonte față de vaporizator. Obiectivul acestei etape fiind adsorbția acizilor liberi, pre-separarea gazelor de ardere și implementarea unui sistem de alimentare redundant a hidroxidului de calciu (Ca(OH)_2) în adsorbția uscată condiționată.

Pornind de la această fază, praful injectat reacționează cu componentele acide gazoase din gazul de ardere. Calcularea și dozarea cantității de hidroxid de calciu depind de conținutul de HCl / SO_2 măsurat în gazele de ardere și se vor stabili ca urmare a valorilor de emisii de HCl / SO_2 în gazul pur, când, pe baza experienței de operare, se va stabili modul de operare suprastoichiometrică.

Injecția prafului de hidroxid de calciu în fluxul de gaze de ardere, în amonte de răcitorul prin evaporare, ajută la evitarea coroziunii pieselor componente ale stingătorului și a căii spre reactor a gazelor de ardere. În plus, această măsură împiedică deteriorarea prin coroziune a canalelor de gaze de ardere conectate și separarea particulelor rugoase. Mai ales în cazul cantităților mari de componente acide din gazele de ardere, această metodă ajută și asigură separarea acestor componente din gazele de ardere conform nivelurilor necesare de emisii în gazele de ardere.

În Treapta III – are loc răcirea gazelor de ardere prin injecție de apă și evaporarea acestora cu scopul reglării temperaturii optime de reacție, necesare pentru epurarea eficientă a gazelor de ardere cu hidroxid de calciu, combinată cu creșterea umidității gazelor de ardere pentru optimizarea reacției chimice de adsorbție. Procesul se desfășoară în vaporizator, prin pulverizarea unui amestec de apă cu aer comprimat prin intermediul unor lance cu duze tip splinker.

Pentru a regla un interval de temperatură adecvat, de aproximativ 130–150 °C, pentru operarea celei de-a doua etape de epurare a gazelor de ardere (sorbție uscată condiționată cu hidroxid de calciu și carbon activ cu calitate de praf aditiv), va fi instalat un răcitor prin evaporare înainte de această etapă de prelucrare.

Pentru a obține efectul de răcire, apa (în acest caz, de preferință apa de proces) va fi injectată în fluxul gazelor de ardere în amonte de linia de reacție din etapa de pre-separare. Cantitatea de apă va fi controlată în funcție de temperatura gazelor de ardere.

În Treapta IV – are loc adsorbția uscată condiționată, unde pe lângă injecția de hidroxid de calciu se injectează și praf de carbon activ, reprezentând faza principală de epurare a gazelor de ardere. În timp ce hidroxidul de calciu este utilizat atât pentru adsorbția componentelor gazoase de acid clorhidric, acid fluorhidric și dioxid de sulf, cât și pentru a ajuta separarea diferitelor metale grele; carbonul activ ajută mai ales la adsorbția metalelor grele, precum mercur și a dioxinelor și a furanilor și a altor componente organice macromoleculare.

Injecția continuă a Ca(OH)_2 și a carbonului activ cu calitate necesare de prafuri aditive cu ajutorul dispozitivului de dozare a prafului aditiv și transportul în gazele de ardere. Prafurile aditive sunt injectate în apropierea rotorului de condiționare, poziționat în cotul camerei inferioare de reacție și sunt distribuite în fluxul de gaze cu ajutorul rotorului de condiționare (dozator cu melc).

În Treapta V – are loc separarea particulelor de material adsorbant concomitent cu optimizarea eficienței de adsorbție a particulelor adsorbante. Separarea se face mecanic într-un filtru cu saci similar cu cel din studiul de caz precedent. Pentru a activa proporțiile de hidroxid de calciu conținute de macroparticulele recirculate, se va asigura o umezire suplimentară a particulelor. Nivelul normal de umidificare este de 1-3 % masice din greutatea materialului recirculat.

O parte din materialul adsorbant reținut în partea inferioară a filtrului cu saci este recirculat în fluxul de gaze de ardere, în amonte de filtru, prin intermediul unui dozator cu melc de condiționare. Cantitatea uzuală de particule recirculate din gazele de ardere: 150 – 300 g/m_N³ umed [103].

Noile prafuri aditive și particulele recirculate condiționate reacționează cu gazele de ardere din cotul camerei de reacție și în camera de gaze de ardere a filtrului. Particulele umezite cresc în mod esențial sorbția de acid din gazele impure. Evaporarea umezelii din particule asigură o răcire considerabilă a gazelor de ardere (în general de 5 – 10 °K) [103].

Hidroxidul de calciu/carbonul activ cu calități de prafuri aditive sunt injectate separat. Astfel, injectarea poate fi reglată și optimizată individual și în conformitate cu condițiile de operare.

Reacțiile chimice de epurare sunt identice cu cel din cazul precedent (vezi ecuațiile 4.11-4.18), doar că modul de activare și desfășurare al reacțiilor are loc într-un flux tehnologic de epurare diferit.

4.6.4Eficiența energetică a incineratorului

Dat fiind faptul că incineratorul de la CET Sud Timișoara nu este construit, fiind doar în fază de proiect, determinarea eficienței energetice a unității de incinerare pentru acest studiu de caz nu este posibilă.

Calculul indicatorilor energetici NCV (puterea calorică netă), Pl_{ef} (eficiență unității de incinerare) și R1 (eficiența energetică a unității de incinerare) necesită date din funcționarea incineratorului, fiind bazate de rezultate concrete și nu ipoteze și premize de calcul.

Valorile parametrilor ce intră în formulele de calcul a acestor indicatori, depind de factori legați de natura deșeurilor incinerate, de modul de exploatare a unității de incinerare ș.a, astfel aproximarea acestora nu reflectă un caz real, prin urmare rezultatele obținute pe baza unor ipoteze de aproximare ar fi neconcludente.

5. GESTIONAREA REZIDUURILOR PROVENITE DIN INCINERAREA DEȘEURILOR MENAJERE

5.1. Particularitățile tratării reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor

Reziduurile rezultate în urma procesului de incinerare al deșeurilor menajere constituie factorul major în ce privește poluarea mediului. Din cantitatea totală de reziduuri produsă, zgura reprezintă cantitatea cea mai însemnată, dar principalul reziduu poluator îl constituie cantitățile de reziduuri provenite de la stația de tratare a gazelor de ardere, întrucât aceste captează și concentrează poluanții conținuți în substanțele care constituie deșeurile [1,8,43]. Indiferent de metoda de tratare a gazelor de ardere conținutul poluanților rămâne același. La ora actuală există mai multe tehnologii pentru tratarea acestor reziduuri (în jur de 30 [43]), dar ca și principii de bază acestea pot fi divizate în trei grupe principale:

- Utilizare ca și materiale de adaos în diferite aplicații industriale;
- Recuperarea materialelor;
- Depozitare finală în haldă.

La ora actuală nu există o metodă de tratare bine definită, care să fie implementată la nivel mondial. În orice caz, aceste reziduuri nu pot fi depozitate fără o pretratare corespunzătoare. În acest sens, pentru stabilirea soluțiilor optime de tratare trebuie avute în vedere următoarele aspecte de bază [43]:

- Tratarea – reziduurile trebuie întodeauna stabilizate/inertizate în scopul reducerii migrării poluanților în mediu. Modul de stabilizare/inertizare se reflectă asupra tehnologiei de depozitare controlată;
- Transportul – găsirea unor soluții optime de transport (rutier, feroviar sau hidraulic) astfel încât să corespundă cerințelor de siguranță mediului și eficiența economică;
- Consum energetic – unele tehnologii de stabilizare/inertizare presupun un consum mare de energie (topire, vitrificare, sinterizare). Astfel alegerea metodei de tratare trebuie să țină cont de acest aspect;
- Levigarea – poluarea mediului prin acțiunea apei meteorice care spală metalele grele continute în reziduuri reprezintă factorul de poluare major al depozitelor de reziduuri, care are un impact pe termen lung (sute de ani);
- Dispersia poluanților – prin utilizarea reziduurilor în diferite proporții ca material auxiliar în produse specifice construcțiilor civile.

Poluarea mediului înconjurător cu poluanții conținuți în aceste reziduuri poate fi generată prin de emisii de praf în aer sau în apă prin levigare. Poluarea aerului cu praf (particule de reziduuri) este rezolvată sub aspect tehnologic, întrucât manevrarea și transportul acestora se face în medii închise care previn acest fenomen. Principala sursă de poluare a mediului o reprezintă poluarea apei de suprafață și subterană, și implicit a solului, este datorată fenomenului de levigare specific depozitelor în haldă. Apa meteorică provenită din ploi și zăpezi, ajunge în contact cu materialul depozitat și reacționează cu poluanții conținuți în masa acestora. În final apa ajunge în pânza de apă freatică unde fenomenul de poluare devine practic incontrollabil [1,8,43]. Prin urmare apa reprezintă mediul de transport

al poluanților conținuți în reziduuri către mediu. Levigarea poate fi definită ca un fenomen de solubilizare a unui element solubil dintr-o formă solidă, având ca rezultat levigatul reprezentat de o soluție cu conținut ridicat de poluanți. Fenomenul de levigare desfășurat într-un astfel de depozit este sintetizat în figura 5.1:

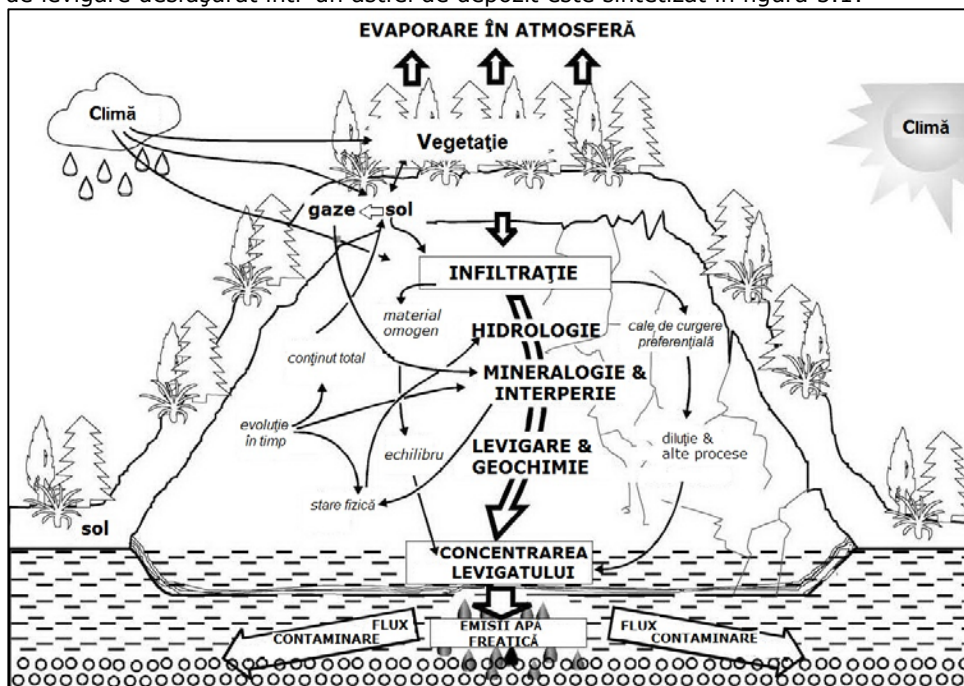


Figura 5.1 – Producerea fenomenului de levigare [8]

Din figura 4.1 se poate observa că, la contactul apei cu masa de reziduu depozitat, levigarea se produce prin două moduri de spălare a poluanților: la suprafața depozitului și în masa depozitului. Levigarea în masa depozitului este puternic influențată de caracteristicile fizico-chimice a materialului depozitat prin: porozitate, densitate, omogenitatea și permeabilitate [1,8]. Dat fiind faptul că reziduurile sunt formate în condiții de temperatură înaltă, acestea sunt foarte reactive în prezența umidității.

Astfel metodele de tratare/inertizare ale acestor reziduuri presupune modificarea parametrilor fizico-chimici într-o măsură mai mică sau mai mare, care să limiteze sau să stopeze migrarea poluanților în levigat. Principalele elemente poluante care migrează prin fenomenul de levigare în mediul ambiant sunt:

- Săruri ușor solubile ca Na și Cl – elemente care în concentrații reduse nu sunt toxice pentru viețuitoare, dar care pot fi dăunătoare pentru echilibrul anumitor ecosisteme;
- Metale grele ca Cd, Cr, Cu, Ni, Pb și Zn – elemente care toxice pentru viețuitoare și ecosisteme. Monitorizarea concentrațiilor în levigat a acestor elemente constituie un factor primordial de referință în metodele sustenabile de stabilizare/neutralizare a reziduurilor;

5.1 Particularitățile tratării reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor 103

- Dioxine și furani – elemente foarte toxice, care de altfel se dizolvă greu în levigat, constituie de asemenea factori de referință în eficiența tratării reziduurilor. În mod normal distrugerea acestora are loc prin procesul de ardere din faza de tratare a deșeurilor.

Pentru minimizarea efectelor de poluare/contaminare a mediului prin depozitarea acestora în haldă metodele de tratare/inertizare a reziduurilor au rolul de a oferi soluții de reducere a poluanților sus menționați în levigat. Acest obiectiv poate fi atins fie prin încapsularea poluanților în matricea materialului depozitat; fie prin eliminarea prin extracție și depozitarea unui material inert (dacă este posibil). Ca impact pe termen scurt, mediu și lung efectul comportării unui depozit în haldă de reziduuri poate fi sintetizat astfel:

Perioada activă	TERMEN SCURT		TERMEN LUNG		
	Depozit în operare	Mentenanță activă	Mentenanță pasivă		
Interval timp	TERMEN SCURT	TERMEN MEDIU	TERMEN LUNG		
	10 ani	100 ani	1000 ani	>1000 ani	
	TERMEN SCURT		TERMEN MEDIU		TERMEN LUNG
	reactivitate ridicată		reactivitate scăzută?		
	pH >8.5		7.5 < pH < 8.5		pH < 7.0
Proces/feonomen	hidratare →		carbonatare →		
	oxidare ←		tampon carbonat →		
	levigare săruri ←		oxidare →		levigare →
	levigare metale ←		levigare metale? →		

Figura 5.2 – Comportarea în timp pentru un depozit de deșeuri menajere [8]

Conform figurii 5.2 se observă că în timp depozitul de zgură rămâne activ sub aspectul contaminării mediului ambiant. Estimarea comportamentului unui astfel de depozit este foarte greu de realizat pe termen mediu și lung, deoarece studiarea acestor probleme s-a accentuat odată cu industrializarea mondială după secolul XIX, astfel estimarea în viitor se poate face doar pe bază de ipoteze. Indiferent de metoda de tratare aleasă marea majoritate a acestor reziduuri sunt depozitate în haldă, fracția reutilizabilă la ora actuală este neglijabilă. Prin urmare există două posibilități de depozitare: subterană și de suprafață.

Depozitarea subterană presupune utilizarea spațiilor subterane rezultate în urma exploatărilor miniere. Depozitarea se face fie hidraulic prin pompare, unde este posibil, fie prin depozitare în saci. Minele de sare sunt cele mai viabile și fezabile din acest punct de vedere, datorită faptului că în mod natural nu sunt conectate hidraulic cu apa freatică din arealul zonei. Depozitarea în aceste condiții este clasificată ca fiind una foarte sigură în ce privește încadrarea geologică pe termen lung. Dezavantajul acestei metode, este evident faptul că minele de sare nu sunt disponibile în numărul care ar fi necesar pentru a putea generaliza această practică la scară largă.

Depozitarea de suprafață rămâne procedeul cel mai larg utilizat pe plan mondial. Majoritatea cercetărilor în ce privește această metodă sunt direcționate în sensul reducerii fenomenului de levigare. Tehnologiile de depozitare actuale presupun o depozitare controlată prin crearea unor condiții speciale de prevenire, tratare și colectare a levigatului specific acestor depozite. În acest sens baza depozitului este pregătită anterior, prin realizarea unor straturi de drenare și colectare levigat; suprafața depozitului este acoperite cu materiale geo textile care să prevină infiltrarea apei, etc., dar cel mai urmărit obiectiv de inertizare a poluanților este stabilizarea chimică a acestora care oferă perspective de siguranță pe termen mediu și lung [1,8,43].

5.2. Metode de tratare a reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor

La ora actuală metodele de inertizare aplicabile sunt:

- Extracția și separare poluanților (metale grele în general);
- Stabilizarea chimică;
- Solidificare;
- Tratare termică.

Aplicarea uneia sau mai multor metode din cele enumerate mai sus se face în funcție de compoziția rezidului și de conținutul de poluanți conținuți în masa acestuia.

5.2.1 Metoda de extracție și separare a poluanților

Metoda de extracție și separare constituie ansamblul proceselor tehnologice care trebuie parcurse pentru a elimina sau recupera una sau mai multe elemente chimice din structura materiei care compune rezidul tratat. Această metodă este specifică recuperării metalelor grele și a anumitor săruri din reziduuri, având la bază procesul de spălare cu apă și utilizarea unor soluții acide [1,8,43,45]. Procesele tehnologice în sine sunt relativ simple, dar în cele mai multe cazuri acestea sunt integrate în procesele aferente stabilizării chimice. Dezavantajul constă în faptul că se obține apă de proces cu conținut ridicat de metale grele și săruri, care trebuiesc suspuse altor procedee de tratare/recuperare. Metoda de extracție și separare a metalelor grele conținute în reziduurile aferente subproduseleor tratării gazelor de ardere, implică una sau mai multe din următoarele procedee [43,45]:

Spălarea cu apă – amestecul reziduurilor cu apă creează o soluție puternic alcalină cu valoarea pH-ului 11-13 și conținut ridicat de săruri de Cl, Na, SO₄, Pb, Zn, Cr și As. Prin acest procedeu se pot extrage majoritatea sărurilor dar reducerea conținutului de metale grele este nesemnificativă 1%. Procedeul de spălare este insuficient astfel este utilizat ca fază de proces premergătoare altor procese. Timpul de spălare este de 0.5-1 ore pentru un raport lichid/solid de 2-5 l/kg. Raportat la masa deșeurilor, prin acest procedeu se extrag cca. 10-30% săruri din masa totală a rezidului. Tehnologia este disponibilă la scară industrială.

Extracția cu soluții acide – procedeul este similar cu cel de spălare cu apă, doar soluția rezultată are un pH redus 3-6. Efectul acestui procedeu constă în faptul că reduce conținutul de metale grele cationice cu 30-60%. Trebuie avut în vedere faptul că acest procedeu nu limitează producerea fenomenului de levigare ci oferă o valoare a gradului de levigare pentru metalele grele decât reducerea a conținutului de metale grele în levigat. Astfel această metodă de extracție ca și cea precedentă

este utilizată ca fază de proces inclusă în alte procese de tratare asociate cu tratarea termică și solidificarea. Tehnologia este disponibilă la scară industrială.

Biohidrometalurgia – reprezintă o metodă bine conturată de sub aspect tehnic, fiind utilizată în extracția metalelor din minereuri „sărace”. Tehnica este cunoscută sub numele de biolevigare, care poate fi aplicată pentru o gamă largă de reziduuri care include și cele tratate în cazul nostru. Gradul de reținere al metalelor grele este mare 50–90%, dar dezavantajul principal îl constituie utilizarea unor cantități mari de apă (20l/kg) și valori pH scăzute (0.5–5). Acest fapt face ca aplicarea tehnologiei la scară industrială nu să fie fezabilă, astfel metoda nu poate fi aplicată decât la scară de laborator.

Electrodializa – utilizează procedeul de hidroliză prin care ionii metalici migrează către anod sau catod. Plăcile (anod sau catod) pe care se depun ionii metalici au rol de separare a ionilor metalici din suspensia lichidă, astfel ionii metalici trebuie dizolvați într-o fază apoasă care necesită utilizarea unor substanțe de dizolvare foarte complexe. Gradul de reținere a metalelor grele variază între 20–70% pentru compuși ai zincului (Zn) pentru un raport lichid/solid de 5 l/kg. Gradul de reținere fiind puternic influențat de realizarea unui amestec cât mai omogen. Utilizarea substanțelor de dizolvare complexe și realizarea unui amestec omogen face ca această metodă să fie disponibilă doar la scară de laborator.

Separarea fracției solide – are la bază vitezele de sedimentare specifice particulelor solide de reziduuri. Procedeul utilizează un reactor de separare umplut cu apă, prin care particulele sunt eliminate în parte superioară a acestuia. Metoda implică și procedeul de spălare, în scopul formării unei suspensii apoase, metoda fiind fezabilă pentru separarea particulelor de agent absorbant $\text{Ca}(\text{OH})_2$ utilizat în tehnologiile uscată și semi-uscată de tratare a gazelor de ardere. Metoda nu reduce cantitatea poluanților din reziduuri, astfel poate fi utilizată ca parte din proces într-o tehnologie de tratare a reziduurilor. Acest fapt face ca metoda să rămână la nivel de laborator.

5.2.2 Metoda de stabilizare chimică a poluanților

Metoda de stabilizare chimică presupune un ansamblu de procese tehnologice ce au ca obiectiv imobilizarea poluanților în matricea reziduurilor. Obiectivul principal îl constituie legarea metalelor grele în matricea unor reziduuri cu proprietăți geochimice. În mod curent metoda este inclusă ca parte din proces în tehnologii de tratare a reziduurilor. Principalul avantaj al acestei metode îl constituie reducerea concentrațiilor de metale grele în levigat și implementarea tehnologică simplă de aplicat. Principalele metode de stabilizare utilizate sunt [1,43]:

Utilizarea aditivilor pe bază de FeSO_4 (sulfat de fier) – aditivi pe bază de oxizi de fier facilitează capacitatea de adroștie a metalelor grele. Procedeul implică parcurgerea mai multor faze:

- Extragerea prin spălare cu apă a sărurilor ușor solubile și adăugarea aditivilor cu FeSO_4 (sulfat de fier);
- Oxidarea fierului pentru realizarea precipitării oxizilor de fier;
- Ajustarea pH-ului la valoarea de 10-11;
- Drenarea conținutului de apă din soluția rezultată.

Se recomandă ca produsul final rezultat, să fie tratat termic prin sinterizare sau reintrodus în procesul de ardere odată cu deșeurile, cu scopul de a fi stabilizat prin vitrificarea zgurii. Tehnologia este bine conturată sub aspect tehnologic, și se găsește implementată la scară industrială.

Stabilizarea cu CO₂ (dioxid de carbon) și H₃PO₄ (acid fosforic) – metoda implică fenomenul de legare (încapsulare) similar cu cel din metoda anterioară, bazat pe proprietățile CO₂ și H₃PO₄. Metoda este specifică stabilizării conținutului de Pb, Zn și Cd care se leagă prin formarea unor compuși de carbonați sau fosfați. Metoda presupune parcurgerea unor etape similare cu cele descrise în metoda FeSO₄. Metoda este dezvoltată pentru aplicații la scară industrială.

Stabilizarea cu fosfați – metoda se bazează pe utilizarea fosfaților ca aditiv utilizat în formarea unor legături chimice de înglobare a metalelor grele prin formarea unor materiale minerale. Procedul presupune realizarea unui amestec ce implică utilizarea unor cantități controlate de apă. Procesul nu necesită drenarea conținutului de apă utilizat, deci nu generează apă reziduală și necesitatea aplicării unor tehnologii de tratare a acesteia. Metoda este disponibilă la scară industrială.

Stabilizarea cu sulfați – similar cu metoda anterioară utilizează sulfați ca material de legare/stabilizarea a metalelor grele având ca rezultat formarea unor compuși insolubili în apă. Procedul este specific tratării apelor reziduale și de proces, și utilizează șlamul rezultat din procedul umed de tratare a gazelor de ardere, care are un conținut ridicat de sulf. Șlamul conține compuși de sulf nereacționați care în amestec cu reziduurile leagă metalele grele în compuși noi, care au proprietăți ce reduc spălarea metalelor grele în levigat. Aplicația la scară industrială este cunoscută sub denumirea de metoda Bamberg.

5.2.3 Metoda de solidificare a poluanților

Metoda de solidificare presupune un ansamblu de procese tehnologice necesare pentru imobilizare/încapsularea fizică și hidraulică a poluanților conținuți în masa reziduurilor. Obiectivul principal al acestei metode îl constituie minimizarea levigării conținutului de metale grele din masa reziduurilor depozitate în haldă. Metoda de solidificare mai este cunoscută și sub denumirea de stabilizare. Metoda presupune stabilizarea chimică a conținutului de metale grele prin reacții chimice de imobilizare (de legare) într-o matrice a unei substanțe utilizată ca material liant, pe baza reacțiilor chimice de cimentare. Principalele avantaje ale acestei metode îl reprezintă simplitatea implementării tehnologice și minimizarea producerii fenomenului de levigare prin îmbunătățirea parametrilor fizico-chimici ai materialului depozitat în haldă [1,28,29,35,38,39,40,41,42,50,51,52]. Metoda de solidificare poate fi aplicată prin următoarele procedee:

Amestecul controlat cu apă – reziduurile cu conținut suficient de elemente pozzolanice (min. 70%) pot fi utilizate ca material liant pentru stabilizarea reziduurilor. Procedul presupune utilizarea efectului pozzolanic de cimentare, dat de conținutul oxidic al materialului liant reprezentat de Al₂O₃ (aluminați), SiO₂ (silicați) și Fe₂O₃ (oxizi de fier). Prin definiție pozzolanii sunt materiale silice sau aluminați care, sub formă de pulberi, generează reacții chimice de legătură cimentoidă în prezența apei și formează reacții chimice de legătură cu hidroxidul de calciu (Ca(OH)₂) în condiții normale de temperatură, având ca rezultat formarea unor compuși solizi din familia cimenturilor [51]. Această metodă poate fi aplicată doar în cazul în care reziduurile au un conținut suficient de elemente pozzolanice, în caz contrar aplicabilitatea metodei se rezumă la fază de proces dintr-un flux tehnologic de tratare a reziduurilor. Ca și aplicabilitate la scară industrială nu a fost dezvoltată o tehnologie care să trateze reziduurile provenite de la unitățile de tratare a gazelor de ardere provenite de la incineratoarele de deșeuri [43]. În schimb, metoda este aplicată cu succes, la scară industrială, pentru reziduurile provenite din arderea cărbunelui inferior în termocentralele energetice la nivel

mondial (SUA, Europa – inclusiv România), fiind fezabilă datorită conținutului ridicat ale elementelor pozzolanice conținute în reziduurile de cenușă ale acestora.

Cementarea reziduurilor – solidificarea prin cementare reprezintă procedeul cel mai răspândit de stabilizare/solidificare a reziduurilor provenite de la unitățile de tratare a gazelor de ardere aferente incineratoarelor. Procedeul constă în stabilirea unor rețete optime de amestec apă, reziduuri, ciment și aditivi. Ca substanțe utilizate drept aditivi pot fi folosite alte categorii de reziduuri care duc la creșterea efectului de cementare. Procedeul este foarte dezbătut în ultimi ani, datorită particularităților oferite prin legarea chimică a metalelor și îmbunătățirea caracteristicilor fizico-chimice ale materialului nou format cu efecte de reducere semnificativă în formarea levigării [8,38,39,40,47,50,51,52]. La ora actuală există mai multe procedee de cementare implementate la nivel mondial, de cele mai multe ori fiind utilizate în combinație cu alte procese de tratare ca extracția acidă și stabilizarea chimică. Metoda este implementată la scară industrială.

Stabilizarea în gips – procedeul are la bază formarea gipsului prin utilizarea conținutului compușilor de calciu din compoziția reziduurilor, prin realizarea unui amestec cu apă și o soluție acidă. Reziduurile sunt trecute într-o suspensie apoasă în care se adaugă o soluție acidă și calcar la un pH de 5-7, valoare la care gipsul precipită. În final pH-ul crește la 8-10 prin adăugarea de var stins - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, astfel metalele precipită odată cu gipsul. Metoda este disponibilă la scară industrială.

Stabilizarea în asfalt – procedeul presupune utilizarea reziduurilor în rețea de fabricare a asfaltului, ca material auxiliar. Consecințele impactului asupra mediului nu sunt suficient de bine documentate la ora actuală, dar se estimează că metoda ar oferi o încapsulare a poluanților cu impact pe termen mediu și lung mai mare decât cea oferită prin procedeul de cementare. La ora actuală metoda este în investigație și a fost practică în zona Țărilor de Jos din Europa și în Japonia [1,43].

5.2.4 Metoda de tratare termică a poluanților

Metoda de inertizare a reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor menajere prin tratare termică presupune încălzirea reziduurilor până la temperaturile la care își modifică compoziția fizico-chimică, trecând în unele cazuri în substanțe vitroase. Obiectivul principal al acestui procedeu constă în producerea unui material în formă stabilă care încapsulează poluanții în matricea lui, fapt care conduce la împiedicarea solubilizării poluanților în levigat. Acest procedeu are la bază temperatura de topire a metalelor. Principalul avantaj al procedeuului îl constituie stabilitatea în timp materialului vitros rezultat și distrugerea conținutului de dioxine și furani. Dezavantajul care-l face greu fezabil de generalizare la scară industrială este dat de consumul semnificativ de energie electrică necesar topirii precum și contaminarea gazelor rezultate în urma procesului de topire cu vapori de metale grele. Principalele procedee de tratare termică a reziduurilor aplicate la scară industrială sunt [1,43]:

Vitrificarea – proces care implică topirea unui amestec de reziduuri cu substanțe cu conținut ridicat de siliciu (sticlă). Amestecul este încălzit la temperaturi de 1300-2000°C, prag la care se formează o masă amorfă vitroasă, care încapsulează poluanții. Proprietățile de stabilitate și înglobare a poluanților în matricea vitroasă rezultată este influențată de aditivi de siliciu utilizați. Masa amorfă rezultată este trecută din starea lichidă în stare solidă prin răcire bruscă prin imersare în apă, astfel produsul final rezultat are un aspect granular, vitros de culoare închisă. Tehnologia este folosită la scară industrială, iar în Japonia masa vitroasă rezultată este utilizată ca materie primă în unele ramuri industriale.

Topirea – procedeul este similar cu cel prezentat anterior, doar că în acest caz nu se utilizează adaos de siliciu. Produsul final se formează prin trecerea treptată prin mai multe faze a topirii metalelor. Prin utilizarea unor praguri de temperatură diferite pentru fiecare fază de topire există posibilitatea de separare a metalelor. Temperaturile variază în același interval ca și la vitrificare. În unele cazuri topirea este eficientizată sub aspect energetic prin adăugarea unor substanțe organice care prin combustie aduc aport energetic procesului. Este de menționat faptul că procedeele de topire și vitrificare este specific inertizării unor reziduuri foarte toxice cu conținut ridicat de metale grele, și nu a fost concepută pentru tratarea termică a reziduurilor provenite de la unitățile de tratare termică pentru deșeuri menajere. Tehnologia există în aplicații implementată la scară industrială.

Sinterizarea – procesul implică procedeul de încălzire a reziduurilor până la pragul de temperatură la care are loc fuzionarea particulelor de reziduu. Procedeul este asociat cu formarea zgurii, în mod obișnuit procedeul implică introducerea reziduurilor în camera de combustie la temperaturi de 900-1300°C, care are ca rezultat formarea unei zguri vitroase cu porozitate mai mică. Procedeul de sinterizare este mai rar întâlnit în aplicațiile industriale, dar se găsește implementat la scară industrială în unitățile de incinerare care utilizează conceptul SYNCOM-PLUS (Synthetic combustion – plus implementat de la KRV-Arnoldstein prezentată ca studiu de caz în capitolul 3.5).

Piroliza – procedeul de topire a deșeurilor cu conținut organic în amestec cu reziduurile provenite din tratarea gazelor de ardere. Rezultatele acestui procedeu reflectate în produsul final rezultat sunt influențate puternic de natura și conținutul deșeurilor topite. Tehnologia nu este disponibilă pentru aplicații la scară industrială, ci a fost testată doar la scară de laborator.

Ca și sumarizare a procedeelelor de tratare explicitate anterior, care să ofere un aspect general asupra nivelului energetic necesar tratării reziduurilor rezultate în urmă incinerării deșeurilor menajere, și nivelul de reducere a poluanților în levigat, datele referitoare la aceste aspecte sunt sintetizate în tabelul 5.1:

Tabelul 5.1 – Caracteristicile procedeelelor de tratare a reziduurilor[43]

Proces	Energie	Apă de proces	Emisii în aer	Levigare	Potențial de recuperare
Extracție și separare:					
Soluție acidă	•	••••		•••••	••
Biomicrometalurgie	•	•••••		••••	•••
Electrodializă	••	••••		••••	••
Separare fracție solidă	••••	•••••		•••••	••••
Stabilizare chimică:					
FeSO ₄	•••	•		•	
CO ₂ /H ₃ PO ₄	•••	••		••	
Fosfați	•••	••		••	
Sulfați	••	•••		•••	
Solidificare:					
Apă	•			••••	
Ciment	••			••	
Asfalt	•••			•	
Gips	••	••		•••	
Tratare termică:					
Vitrificare	•••••	•	•••••	•	•••••
Topire	•••••		•••••	•	•••••
Sinterizare	•••		••••	••	•••
Piroliză	••••	•	•••••	•	•••••

În tabelul 5.1 caracteristicile procedeelor de tratare au asociate calificative de la 0 la 5, care reflectă gradul de realizare a obiectivelor urmărite de fiecare metodă în parte sau consumurile energetice și emisiile în mediu, după caz. Tabelul este util în stabilirea unor linii tehnologice de tratare a reziduurilor, compuse din combinarea mai multor procedee pentru atingerea obiectivelor urmărite în aplicația pentru care se conține linia tehnologică.

5.3. Contribuții privind metoda de tratare prin solidificarea reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor menajere

5.3.1 Aspecte relevante privind metoda propusă

Metoda de tratare a reziduurilor prin procedeul de solidificare a reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor menajere supusă studiului experimental aferent prezentei lucrări, este reprezentată de aplicarea tehnologiei de depozitare prin metoda șlamului dens. Tehnologia este aplicată la nivel mondial și la noi în țară la solidificarea zgurii și cenușii provenită de la termocentralele cu cărbune, fiind implementată și funcțională în țara noastră la CET Sud Timișoara, CET Turceni, CET Rovinari, CET Craiova II și CET Ișlanița, unități aferente Sistemului Energetic Național – SEN.

Metoda de solidificare se poate aplica atât reziduurilor sub formă de zgură cât și la cele sub formă de pulberi caracteristice reziduurilor provenite de la stația de tratare a gazelor de ardere din cazul unităților de incinerare a deșeurilor menajere. Metoda propusă reprezintă un concept original, dezvoltat pe baza experienței dobândite în cadrul activității mele ingineresti la Institutul de Studii și Proiectări Energetice – Sucursala Timișoara, ca șef proiect specialitate în proiectarea și implementarea tehnologiei de șlam dens la CET Craiova II și CET Ișlanița.

Inovația în metoda nou propusă constă în intergarea reziduurilor provenite de la incinerarea deșeurilor într-o rețetă de șlam dens care utilizează ca material liant cenușa provenită din arderea cărbunelui și produsele de desulfurare aferente unității de tratare a gazelor de ardere rezultate din procedeul semiuscat, ce folosește ca material absorbant hidroxidul de calciu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Metoda propusă reprezintă crearea unei rețete de amestec omogen bizafic într-un raport de amestec particule solide/apă bine stabilit pe baza compoziției oxidice a cenușilor provenite din arderea cărbunelui care reflectă conținutul de elemente pozzolanice. Amestecul de particule solide se constituie din cenuși provenite din arderea cărbunelui, cenușă, zgură și reziduuri de tratare a gazelor de ardere prelevate de la unități de incinerare a deșeurilor menajere. Partea lichidă este reprezentată de apă de proces care are rolul de activare a reacțiilor chimice de cementare a elementelor pozzolanice. Prin amestecarea în rețete controlate a particulelor solide cu apa de proces, se crează un fluid dens (șlam) cu caracteristici pompabile de transport printr-un sistem de conducte, care deversează în sistem controlat de depozitare în haldă.

Produsul final al tehnologiei șlamului dens îl reprezintă formarea rocii de cenușă datorată reacțiilor chimice de cementare. Roca de cenușă are caracteristici fizico-chimice ce previn formarea fenomenului de levigare desfășurat în masa reziduuului depozitat. În urma reacțiilor de cementare, se formează un material cu o structură care înglobează compușii poluanți din compoziția chimică a reziduurilor provenite de la unitățile de incinerare a deșeurilor menajere. Activitatea de cementare generată de pozzolani se desfășoară pe o durată lungă de timp, astfel procesul de solidificare continuă mult timp după depozitarea în haldă a reziduuului. În altă ordine de idei,

odată cu trecerea timpului are loc o creștere a solidificării materialului depozitat. Ca timp de întărire imediată, după 24 de ore de la depozitare se poate călca fără probleme pe suprafața masei de reziduu depozitat. Pe de altă parte, elementele pe bază de compuși de calciu, găsiți în cantități mari în masa reziduurilor aferente sistemelor de tratare a gazelor de ardere, contribuie la accelerare și solidificarea rocii de cenușă, care are impact pozitiv în minimizarea fenomenului de levigare specific depozitării în haldă.

Pentru determinarea rețetelor de șlam conform experimentării noii metode de tratare prin solidificare a reziduurilor, s-a realizat un stand experimental „Mixer Hidraulic”, cu scopul creării amestecului bifazic – șlam. Materialele utilizate în scop experimental au fost prelevate din țară și străinătate, astfel cenușa și reziduurile provenite de la unitatea de desulfurare a gazelor de ardere provenite de la termocentralele pe cărbune au fost prelevate de la CET Sud Timișoara; iar zgura, cenușa și reziduurile provenite de la unitatea de tratare a gazelor de ardere aferente incineratoarelor pentru deșeurii menajere au fost prelevate de la două unități de incinerare din Austria (Niklasdorf și Arnoldstein) și o una din Germania (Glückstadt). Motivul utilizării reziduurilor provenite de la unități de incinerare deșeurii menajere din afara țării noastre, constă în faptul că la ora actuală România nu dispune de astfel de unități.

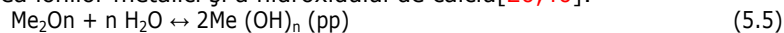
5.3.2 Reacțiile chimice de cementare care stau la baza tehnologiei de solidificare prin metoda șlamului dens

Metoda nouă propusă de tratare a reziduurilor aferente incinerării deșeurilor menajere, are la bază reacțiile chimice de cementare caracteristice elementelor pozzolanice conținute în cenușa provenită de la incinerarea cărbunelui inferior (lignit). După cum am menționat anterior (vezi cap.5.2.3), elementele pozzolanice sunt reprezentate de oxizii de Al_2O_3 , SiO_2 și Fe_2O_3 . Pentru ca materialul pozzolanic să prezinte proprietăți de autocementare, acesta trebuie să fie în stare de pulbere fină și să aibă un conținut masic de oxizi $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$. Aceste proprietăți sunt caracteristice cenușii de electrofiltru provenite din arderea cărbunelui. Reacțiile chimice de cementare care stau la baza procesului de solidificare a amestecului se desfășoară în mai multe faze, după cum urmează:

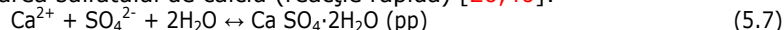
- 1.) Hidratarea oxizilor din cenușă [50]:



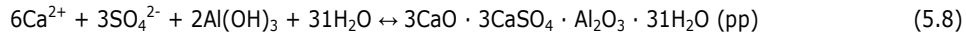
- 2.) Hidratarea ionilor metalici și a hidroxidului de calciu [20,40]:



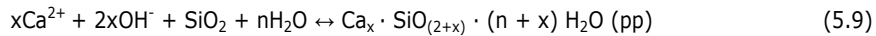
- 3.) Cristalizarea sulfatului de calciu (reacție rapidă) [20,40]:



4.) Formarea rocii de cenușă (la început reacție rapidă) [20,40]:



5.) Formarea hirdaților de silicat de calciu (reacție lentă) [20,40]:



Mecanismul de cementare se desfășoară potrivit reacțiilor chimice de mai sus prin care compușii pe bază de calciu, conținuți în reziduurile specifice tratării gazelor de ardere ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ în cazul nostru), reacționează cu compușii pozzolanici și formează diferite faze de cristalizare prin care generează compuși de silicați de calciu, aluminat de calciu și alumino-silicați de calciu care ulterior hidratează în prezenta apei conținută în hidrații derivați auxiliar. Aceste reacții de hidratare sunt responsabile în ce privește caracterizarea gradului de solidificare al rocii de cenușă.

Pe durata procesului de cementare rezultă formarea unor noi compuși minerali nedizolvabili în apă. Noile cristale minerale formate se depun treptat prin crearea unor legături de aderare la celelalte particule din masa șlamului, care înglobează poluanții conținuți în masa de șlam creată. Matricea rocii de cenușă formată astfel înglobează elementele poluante (metale grele) prin fenomenul de adsorbție. Reacțiile chimice dintre elementele oxidice pozzolanice din cenușă și hidroxidul de calciu sunt considerate ca elemente principale în controlul fenomenului de cementare. Formarea fazelor complexe de aluminați, calcinarea fierului și a aluminosilicaților nu pot fi controlate sub aspect al reacțiilor chimice [28].

Reacțiile chimice de cementare care stau la baza solidificării amestecului bifazic omogen particule reziduuri/apă caracteristice tehnologiei șlamului dens sunt influența de derularea următoarelor fenomene:

- Amestecarea intensă a particulelor solide cu o cantitate redusă de apă raportată la masa de solide, dizolvă oxizii de calciu. Soluția rezultată activează parțial suprafața particulelor de cenușă.
- Prezența hidroxidului de calciu format reacționează cu mineralele dizolvate în șlam, și prin reacțiile cu oxizii de siliciu (SiO_2) și oxizii de aluminiu (Al_2O_3) se formează hidrații de aluminat de calciu element cunoscut în procesul de cementare;
- Prezența substanțelor reducătoare ca sulfații și sulfiții conduc la scăderea pH-ului și la precipitarea masivă a carbonatului de calciu care duc la formarea sulfaților de aluminiu care contribuie la formarea reacțiilor chimice de cementare.

În realizarea șlamului dens cu caracteristici de autoîntârrire dozarea cantității de apă joacă un rol decisiv în procesul de solidificare. Dacă cantitatea de apă este prea mare apare fenomenul de diluție a elementelor care participă la reacțiile de cementare și solidificarea nu mai are loc, adică nu se mai formează roca de cenușă. Prin urmare, conform rezultatelor experimentale, raportul maxim de amestec solide/apă este de 1/3. Pentru această valoare se obține un exces de apă care vine în detrimentul obiectivelor urmărite în ce privește depozitarea în haldă, deoarece apare o cantitate de apă reziduală. Roca de cenușă astfel obținută are caracteristici fizico-chimice mai slabe. Excesul de apă dispăre pentru un raport de amestec solide/apă de 1/2, cu creștere semnificativă a caracteristicilor fizico-chimice a rocii de cenușă. Experimental s-a constatat că raportul optim de amestec solide/apă este de 1/1.32, valoare la care se păstrează atât desfășurarea autoîntâririi în timp scurt (24 ore), cât și proprietățile de pompabilitate cuantificate în vâscozitatea și

densitatea fluidului, în scopul transportului prin sisteme de conducte pentru deversarea controlată pentru depozitarea în haldă. Detaliile specifice acestor aspecte vor fi descrise în amănunt, pe baza informațiilor experimentale, în capitolele următoare.

5.3.3 Proiectarea și dimensionarea standului experimental mixer hidraulic

Realizarea amestecului bifazic omogen aferent tehnologiei de șlam dens, are loc într-un mixer hidraulic unde se face dozarea controlată a fazei solide cu cea lichidă. Astfel nucleul tehnologiei constă în capacitatea de creare a unui șlam dens cât mai omogen care depinde de performanța de amestecare a mixerului hidraulic. Sub aspect constructiv, mixerul hidraulic este format dintr-un cap de amestec, un rezervor și două pompe de recirculare. Elementele constructive ale unui astfel de utilaj industrial, este prezentată în figura 5.3:

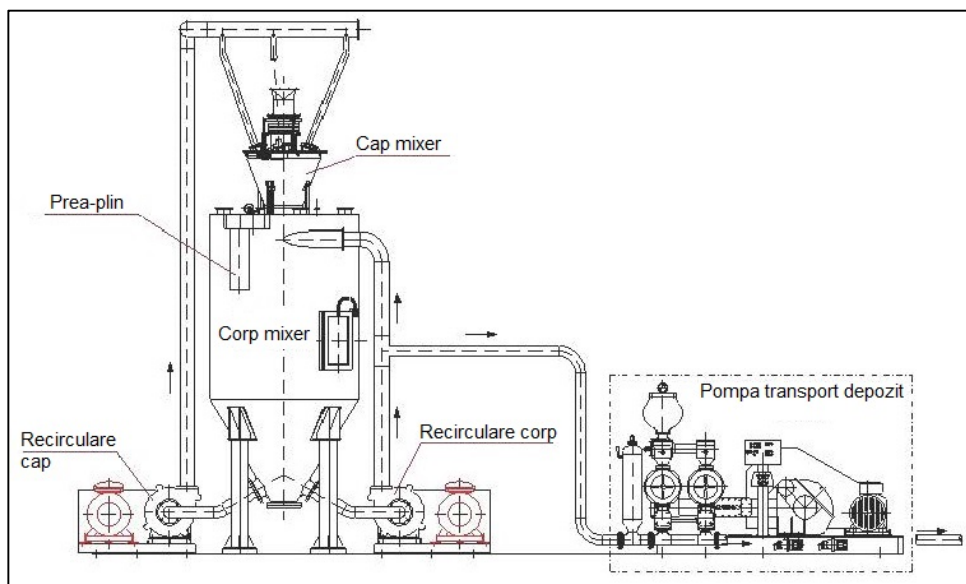


Figura 5.3 – Elementele componente ale unui mixer hidraulic industrial

Modul de amestecare realizat într-un astfel de utilaj parcurge următoarele faze de omogenizare:

- *Faza 1* - în această fază are loc preamestecarea și dozajul fazei solide cu faza lichidă în capul mixerului. Particulele solide sunt alimentate prin partea superioară a capului, prin intermediul unui dozator celular. În cădere, particulele solide sunt antrenate într-un vortex circular de apă creat prin injecția de apă prin duze amplasate tangențial la capul mixerului. Tot aici, prin intermediul unei pompe, are loc și o injecție de șlam prin recircularea unei fracțiuni de material colectat de la partea inferioară a mixerului;

- *Faza 2*- în această fază are loc omogenizarea amestecului format anterior, proces care se desfășoară în corpul mixerului. Tot aici, pentru realizarea unui amestec cât mai omogen, are loc recircularea șlamului colectat din partea inferioară a mixerului, prin intermediul pompei de recirculare corp mixer. O parte din șlamul recirculat este preluat de pompa de transport șlam dens pe depozit;
- *Faza 3* – se desfășoară în pompele centrifuge de recirculare cap și corp mixer. Această fază este considerată faza de activare a reacțiilor chimice de cementare pentru particulele de solide.

Prin desfășurarea simultană a celor trei faze are loc realizarea unui amestec foarte omogen, care asigură suspensia uniformă a particulelor solide în masa lichidă. Vortexul creat de forma circulară a mixerului hidraulic și viteza acestuia creată de debitul aspirat de cele două pompe de recirculare, contribuie la accelerarea și activarea reacțiilor chimice de cementare.

Cea mai importantă fază este considerată faza a treia, unde are loc activarea elementelor pozzolanice din cenușă, prin fracționarea particulelor de cenușă la impactul cu statorul pompei, datorată forței centrifuge indusă de rotor. Consecința acestui fenomen duce la spargerea crustei vitroase a particulei de cenușă și facilitează pătrunderea apei în structura scheletului mineral al particulei solide, care declanșează reacțiile chimice de cementare descrise anterior.

Pe baza principiului de activare chimică prezentat mai sus, se poate concluziona că, pentru realizarea unui mixer hidraulic la scară de laborator, este suficient corpul de mixerului și pompa de recirculare corp.

Pentru a obține efectul de cementare urmărit, este necesar ca forma rotorului aferent pompei centrifuge să fie într-un anumit fel. În altă ordine de idei, forma rotorului pompei și turația acestuia sunt decisive pentru atingerea obiectivului urmărit. În acest scop caracteristicile pompei utilizate în tehnologia șlamului dens trebuie să îndeplinească următoarele cerințe tehnice minime de bază:

- Carcasa pompei să fie solidă de formă circulară, confecționată dintr-un material rezistent la abraziune ca fontă sau aliaje de oțel;
- Forma închisă a rotorului pompei, adică să aspire central și să refuleze centrifugal;
- Viteză centrifugă optimă (recomandat 1200-1450 rpm).

În aplicațiile industriale, se recomandă ca etanșarea lagărelor aferente rotorului pompelor de recirculare mixer hidraulic, să se realizeze cu apă pentru a preveni uzurile și a prelungi durata de viață a pompei.

Dacă rotorul pompei nu are forma închisă, procentul de fracționare al particulelor solide nu mai este același, astfel proprietățile de auto-cementare a șlamului rezultat sunt net inferioară. De asemenea suprafața de contact a șlamului cu pereții interiori ai mixerului trebuie să fie acoperiți cu material ceramic rezistent la abraziune.

În figura 5.4 de mai jos se prezintă mixerul hidraulic proiectat la scară de laborator, din faza de proiectare în faza realizată, precum și un model de pompă centrifugă pretabili în astfel de aplicații:

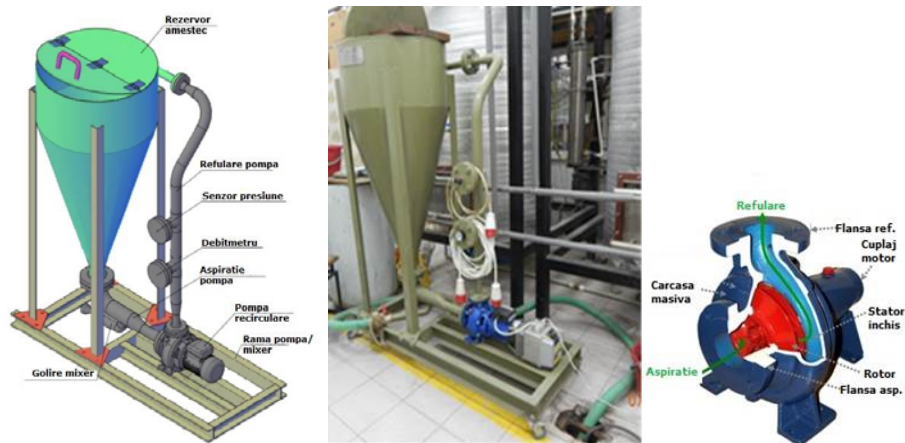


Figura 5.4 – Realizarea mixerului hidraulic experimental la scară de laborator

Pentru o funcționare corespunzătoare a mixerului hidraulic, care să evite colmatarea acestuia, este necesar ca viteza de recirculare să fie continuă și să nu coboare sub o valoare minimă la care particulele sedimentează. Viteza de recirculare este influențată de raportul de amestec solid/lichid, de mărimea particulelor în suspensie, de densitatea și vâscozitatea șlamului dens.

Prin amestecarea particulelor fine (pulberi sub 100 μm) cu apă, se formează șlamul, care se comportă sub aspect hidraulic diferit de fluidele Newtoniene (care nu sedimentează). Sunt mai multe tipuri de șlamuri dar cel din cazul nostru face parte din categoria fluidelor Bingham.

Un fluid Bingham poate fi descris ca un fluid Newtonian dar cu un parametru adițional numit tensiune decurgere τ_0 . În repaus acest tip de fluid se comportă ca o substanță gelatinoasă (jeleu), iar în mișcare ca o substanță solidă. Dacă sub acțiunea fluidului se aplică o tensiune mai mică decât τ_0 fluidul se deformează elastic, urmând să revină în forma inițială îndată ce tensiunea aplicată este eliminată. Dacă asupra fluidului se aplică o tensiune mai mare decât τ_0 atunci fluidul începe să curgă [36]. Deci tensiunea de curgere τ_0 poate fi privită ca o tensiune de prag, peste care începe curgerea fluidului Bingham.

În alta ordine de idei, regimul de curgere al șlamului dens trebuie menținut în zona turbulentă pentru evitarea sedimentării particulelor solide în suspensie. Viteza de curgere optimă poate fi determinată pe baza diagramelor de curgere Durand sau Wilson sau prin programe de simulare a curgerii care au modul de calcul pentru fluide bifazice cu particule în suspensie. În faza de proiectare a standului experimental prezentat am utilizat software-ul Piping System Fluid Flow v.3.2.

În datele de proiectare pentru dimensionarea mixerului hidraulic am pornit de la stabilirea unui volum maxim de amestec rezonabil de 250 litri, care implică utilizarea unor cantități de cenușă de până la 50 kg. Dat fiind faptul că, pentru scopul cercetării experimentale dozajul se realizează prin cântărire în recipiente manevrabile de o singură persoană, s-a renunțat la capul de amestec.

Pentru realizarea unui amestec hidraulic omogen, am speculat forma corpului mixerului, în sensul că prin forma geometrică aleasă și injecția tangențială a șlamului recirculat crează un vortex în interiorul recipientului de amestecare. Astfel forma geometrică și raporturile geometrice parte cilindrică/conică proiectate sunt reprezentate în figura 5.5:

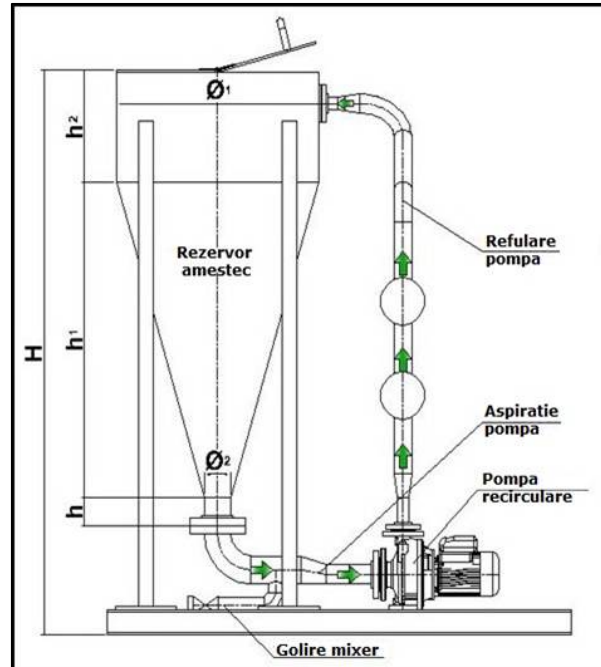


Figura 5.5 – Dimensiunile proiectării mixerului hidraulic experimental [m]:
 $H=1.79$, $h=0.09$, $h_1=1.0$, $h_2=0.35$, $\Phi_1=0.7$, $\Phi_2=0.09$.

Caracteristicile tehnice pentru standul proiectat sunt sintetizate în tabelul 4.2:

Tabelul 5.2 – Caracteristici tehnice stand experimental

Mixerul hidraulic	
Volum maxim util	250 litri
Volum total	267 litri
Material	5mm tablă
Pompa de recirculare	
Tip	Centrifugă
Fluid de lucru	Apă cu particule în suspensie (șlam)
NSPH (Net pumping suction head)	0.1 m
Presiune de lucru	0.5 bar
Înălțime de pompare	4.4 m
Tip rotor	Formă închisă
Material rotor	Oțel inox
Carcasă pompă (stator)	Fontă turnată
Turație maximă motor	1450 rpm
Convertizor frecvență	VASCO 209

Datele tehnice prezentate în tabelul 4.2 sunt foarte utile în vederea extinderii și completării acestuia pentru realizarea altor campanii experimentale, în cazul cercetărilor interesați în domeniile conexe. Rezultatele experimentale obținute cu standul proiectat au confirmat practic obiectivele urmărite în realizarea șlamului dens. În figura 5.6 sunt prezentate imagini care susțin veridicitatea obiectivelor urmărite:

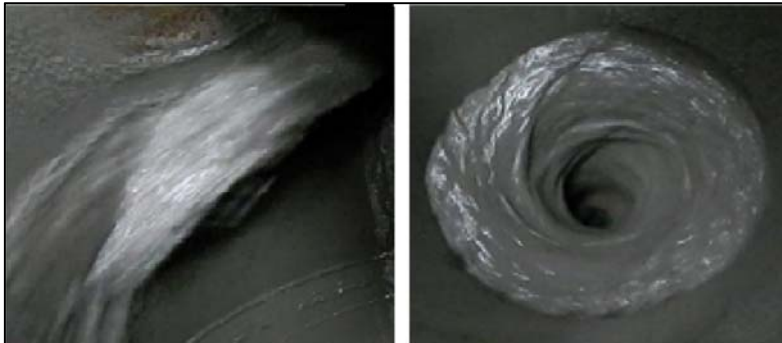


Figura 5.6 – Omogenizarea amestecului bifazic solide/apă

Pe standul experimental proiectat s-au făcut un set de experimente de 7 serii pe perioada 5.01.2015-20.05.2015, realizând diferite rețete de amestec pentru obținerea șlamului cu proprietăți de auto-întărire, dintre care cele mai reprezentative sunt descrise explicit în capitolele următoare.

De asemenea standul experimental a fost utilizat în cadrul unui proiect de colaborare UPT-COLTERM, în vederea determinării rețetei de șlam optime pentru integrarea produselor de desulfurare într-o nouă rețetă de șlam dens, în vederea stabilirii parametrilor optimi de transport hidraulic prin conducte pentru deversarea în depozitul de cenușă de la Utvin. Proiectul este denumit: „*Experimentări și determinări de laborator pentru identificarea rețetei optime de amestecare (preparare) a șlamului dens din cenușă, zgură, subprodus de desulfurare de la CET Sud Timișoara, în vederea transportului hidraulic a șlamului nou rezultat, cu echipamentele existente, la depozitul de zgură și cenușă de la Utvin.*” În acest scop standul experimental a fost instalat în incinta CET Sud Timișoara, în zona stației de preparare a șlamului dens existente, unde s-au derulat experimente „on-site”:



Figura 5.7 – Experimente „on-site”

6. EXPERIMENTE PRIVIND TRATAREA REZIDUURILOR PRIN SOLIDIFICARE CU METODA ȘLAMULUI DENS

6.1. Materiale utilizate și metoda experimentală aplicată

Cercetarea experimentală efectuată în prezenta lucrare se referă la metoda de tratare prin stabilizare/solidificare a reziduurilor provenite de la unitățile de incinerare pentru deșeuri menajere în roca de cenușă obținută prin tehnologia șlamului dens, ce utilizează ca material liant cenușa de electrofiltru și reziduu de desulfurare provenite din arderea cărbunelui inferior (lignit) (vezi cap.5.3).

Altfel spus, se urmărește înglobarea reziduurilor toxice rezultate în urma procesului de tratare a gazelor de ardere provenite de la incinerarea deșeurilor menajere; în matricea rocii de cenușă obținută prin tehnologia șlamului dens.

În acest scop am utilizat standul mixer hidraulic, proiectat și realizat pentru obținerea șlamului dens, prezentat în detaliu în capitolul 5.3.3. Materialele utilizate și abrevierile acestora utilizate în experimentele efectuate sunt:

- Material liant – prelevate de la termocentrala CET Sud Timișoara:
 - FA cenușa de electrofiltru,
 - FGD și reziduu de desulfurare.
- Reziduuri toxice – cenușă grosieră și produse provenite de la stația de tratare a gazelor de ardere prelevate de la unități de incinerare deșeuri menajere, prelevate de la:
 - A. MSWI KRV Arnoldstein – Austria (ardere pe sistem grătare mobile)
 - T_{1A} – reziduu unitate epurare gaze ardere,
 - T_{1B} – zgură de grătar.
 - B. MSWI Niklasdorf Styria – Austria (ardere în pat fluidizat staționar)
 - T_{2A} – cenușă grosieră de ciclon,
 - T_{2B} – reziduu unitate epurare gaze ardere.
 - C. MSWI Glückstadt – Germania (ardere în pat fluidizat circulant)
 - T₃ – cenușă grosieră de ciclon.

S-au utilizat reziduuri toxice prelevate de la unități de incinerare a deșeurilor menajere care au tehnologii diferite de incinerare, cu scopul de a studia dacă modul de formare a acestor reziduuri influențează metoda de stabilizare/solidificare abordată.

6.1.1 Compoziția chimică a cenușilor utilizate

După cum am prezentat în capitolele anterioare (vezi cap.5.2.3 și cap.5.3.2), elementele pozzolanice conținute în cenușa de electrofiltru provenită din arderea cărbunelui au un rol decisiv în reacțiile chimice de solidificare/cristalizare care formează roca de cenușă.

Prin definiție pozzolani (SiO_2 , Al_2O_3 și Fe_2O_3) sunt materiale ce conțin silicați, aluminați și alumino-silicați care sub formă de pulberi și în prezența apei

118 Experimente privind tratarea reziduurilor prin solidificare cu metoda șlamului dens– 6

reacționează cu hidroxizii de calciu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) la temperatura ambiantă, formând compuși cu proprietăți de cementare/solidificare [51].

În cazul nostru, produsul pe bază de calciu provenit de la unitatea de tratare a gazelor de ardere, joacă un rol de activare a compușilor pozzolanici conținuți în cenușă, care în urma reacțiilor chimice dezvoltă diferite faze de cristalizare (vezi reacții chimice cap.5.3.2).

Pentru evaluarea gradului de reactivitate al substanțelor solide utilizate ca material liant (cenușă și reziduu desulfurare) am efectuat analiza oxidică a acestora. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele 6.1 și 6.2.

Tabelul 6.1 – Compoziția oxidică a cenușii de cărbune

Element	Concentrația % (masic)
Carbon (nears)	3.90
Na_2SO_4	0.40
K_2SO_4	1.56
CaSO_4	2.45
CaO	8.17
MgO	1.75
Fe_2O_3	7.22
TiO_2	0.29
Al_2O_3	15.41
SiO_2	58.77
Alte substanțe	0.08

Conform rezultatelor prezentate în tabelul 6.1, se observă că, conținutul de elemente pozzolanice SiO_2 , Al_2O_3 și Fe_2O_3 este de 81.4 %, valoare care reflectă un grad ridicat de al proprietăților de cementare ce caracterizează cenușa utilizată. Pe lângă aceste elemente cenușa conține un procent de 8.7 % oxid de calciu (CaO) care contribuie la activarea substanței active (pozzolani).

Tabelul 6.2 – Compoziția reziduuului de desulfurare

Element	Concentrația % (masic)
CaCl_2	0.05
CaSO_3	24.12
CaSO_4	24.87
CaCO_3	15.12
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ activ	15.20
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ inactiv	19.50
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	0.22
Al_2O_3	0.06
SiO_2	0.40
Alte substanțe	0.54

Conform rezultatelor prezentate în tabelul 6.2, se observă o concentrație ridicată de 83 % pentru compușii care participă la reacțiile chimice de solidificare a rocii de cenușă.

Pentru determinarea concentrațiilor de metale grele conținute în reziduurile toxice utilizate am efectuat analize cu metoda FRX (Flourescence Radiation X) pe un aparat model XL3t GOLD⁺ FROM Thermo Scientific, din dotarea Institutului de Cercetare pentru Energii Regenerabile – ICER. Rezultatele obținute în urma analizelor pentru fiecare reziduu toxic sunt prezentate în tabelul 6.3.

Tabelul 6.3 – Conținutul de metale grele în reziduurile toxice investigate

Element	V.M.A*	Valori determinate [mg/kg]				
		T _{1A}	T _{1B}	T _{2A}	T _{2B}	T ₃
As	25	41	15	<0.01	36	<0.01
Ba	300	1028	645	1917	1495	<0.01
Cd	5	<0.01	<0.01	224	48	56
Cr_{tot}	70	211	403	696	762	293
Cu	100	451	1193	9360	5598	3190
Hg	2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Mo	30	30	20	108	82	10
Ni	40	29	69	476	516	177
Pb	50	1881	660	6705	678	1206
Sb	5	703	124	962	320	<0.01
Se	7	11	3	9	7	<0.01
Zn	200	11100	6771	14200	8022	8339
Cl⁻	25000	sld.*	sld.*	sld.*	sld.*	sld.*
F⁻	500	sld.*	sld.*	sld.*	sld.*	sld.*
SO₄²⁻	50000	sld.*	sld.*	sld.*	sld.*	sld.*

*V.M.A–valori maxime admise conform Ministerului de Mediu Ordinul No.95 din 12/02/2005, pentru materiale toxice
*sld. – sub limita de detecție pentru metoda de analiză FRX

Conform valorilor din tabelul 6.3 se observă că reziduurile provenite de la incineratoarele pentru deșeuri menajere au un conținut variat de metale grele, unele valori fiind foarte ridicate cum ar fi pentru Ba, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb și Zn.

6.1.2 Prepararea probelor investigate și pregătirea analizelor

După cum am prezentat anterior (vezi cap.5.3) formarea rocii de cenușă și caracteristicile fizico-chimice ale acesteia sunt influențate de cantitatea de apă utilizată în prepararea șlamului dens. Probele investigate sau obținut prin înglobarea reziduuului toxic într-un fluid dens sub formă de șlam, care în urma procesului de solidificare, încapsulează și fixează în matricea rocii de cenușă elementele toxice conținute în reziduul toxic. Prin urmare, realizarea probelor investigate s-a desfășurat în două faze principale după cum urmează:

- I. Prepararea șlamului dens (SD) – reprezentat de fluidul bifazic omogen obținut în mixerul hidraulic prin amestecarea materialului liant (cenușa FA și reziduul FGD) cu apă. Raportul de amestec substanță solidă (S)/apă (W) de $S/W=1/2$ masic, în care substanța solidă este reprezentată de FA și FGD, în proporție masică de 75% FA și 25% FGD. Timpul de amestec în mixerul hidraulic a fost de 15 min.
- II. Înglobarea reziduuului toxic – realizat prin introducerea acestuia în masa șlamului (SD) creat în faza precedentă. Raportele de amestec între reziduurile toxice și șlamul dens pentru obținerea probelor investigate sunt:
 - Proba 1: 80% SD + 10% T_{1A} + 10% T_{1B}
 - Proba 2: 80% SD + 20% T_{1A}
 - Proba 3: 80% SD + 10% T_{2A} + 10% T_{2B}
 - Proba 4: 80% SD + 20% T_3 .

Amestecul astfel obținut a fost turnat în matrice, concepute astfel încât să simuleze un comportament cât mai apropiat cu cel al unui depozit de zgură și cenușă pentru deversarea în formă de șlam dens. În acest sens matritele de turnare au fost confecționate din polistiren extrudat, pe fundul cărora am realizat un pat drenant format din 1 cm nisip peste care am așezat un material geotextil. Matrița de turnare a probelor investigate este prezentată în figura 6.1.

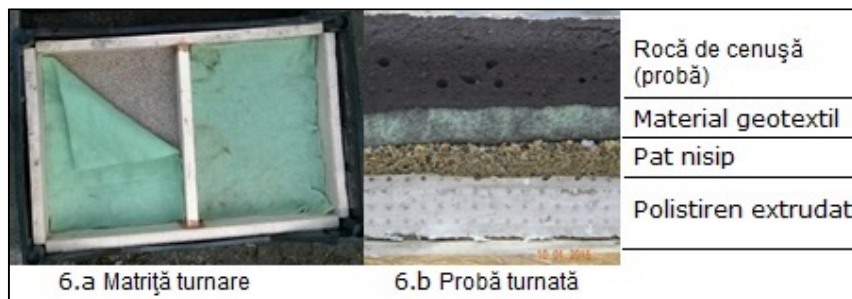


Figura 6.1– Matriță turnare probe investigate

Prin turnarea probelor în acest mod, în timpul solidificării nu apar fisuri în roca de cenușă investigată, iar cantitatea de apă conținută în masa șlamului dens se consumă în reacțiile de chimice de cementare. Cantitatea de apă evaporată la suprafața masei de șlam turnate fiind neglijată.

După turnare, probele au fost ținute în condiții ambiante timp de 28 zile, perioadă necesară pentru solidificarea completă a rocii de cenușă. Timpul de uscare de 28 zile este pacticat în realizarea probelor pentru betoane, fiind perioada de timp în care se consideră că reacțiile chimice de cementare sunt complete și întreaga cantitate de apă este consumată.

Din fiecare probă s-au prelevat mostre de 25x25 mm și au fost spuse testelor de levigare pentru investigarea conținutului de metale grele. Analiza levigatului s-a făcut la intervale de timp de 24 h, 7 zile, 14 zile și 28 zile. În figura 6.2 sunt prezentate fazele de pregătire a probelor în scopul efectuării analizelor de levigare:

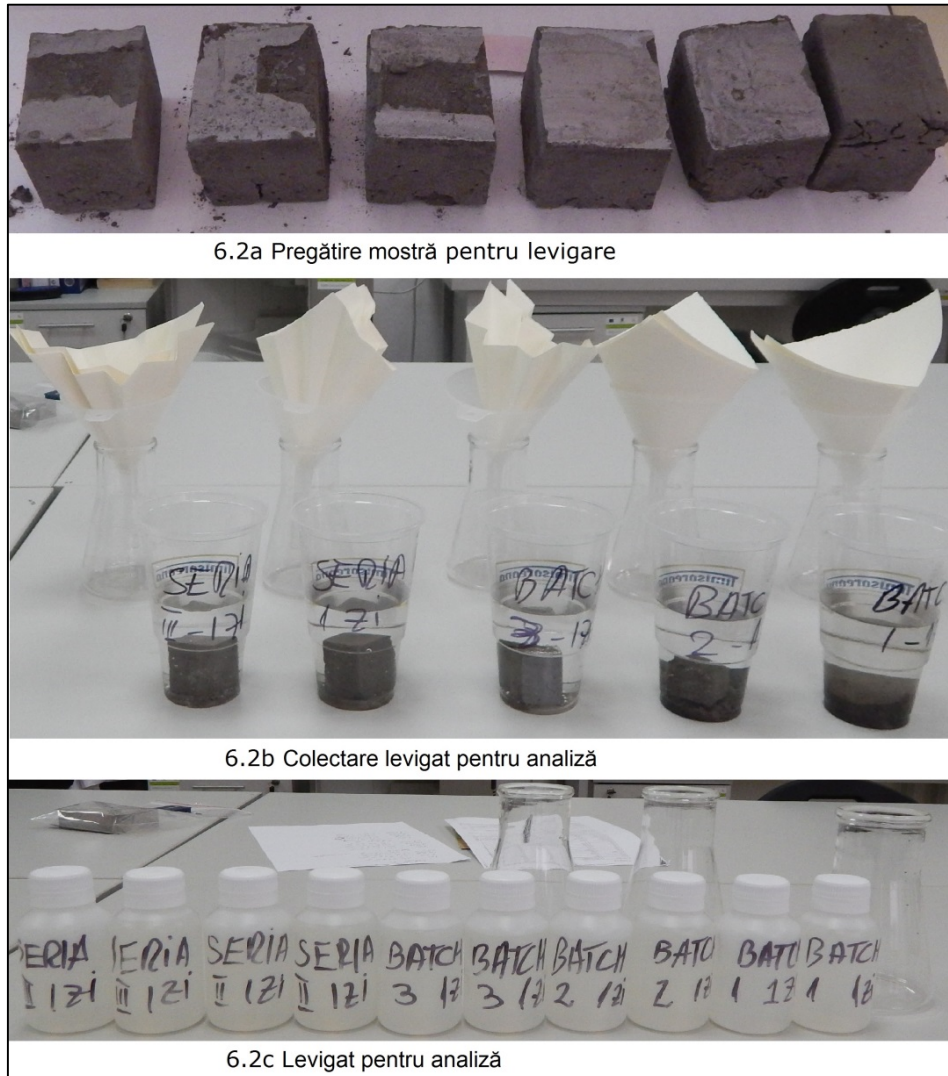


Figura 6.2– Pregătirea probelor pentru analiză

Testele de levigare s-au efectuat conform standardului SR-EN 12457-2003, iar valorile obținute au fost comparate cu valorile maxime admise date prin Ordinul Ministerului de Mediu Nr.95 din 12.02.2005, care transpus în legislația europeană este European Council Decision 2003/33/EC și art.16 Anexa II din EU Directive 1999/31/EC.

6.2. Rezultatele testelor de analiză pentru probele investigate

Pentru investigarea proprietăților rocii de cenușă am efectuat două tipuri de analize și anume:

- Analiza chimică a rocii de cenușă – determinată prin difracție în raze X (XRD), utilizând aparatul Rigaku Ultima IV Difractometer (cu radiația $K\alpha = 0.154$ nm). Prin acest set de analize am determinat structura și formele de cristalizare a rocii de cenușă formate prin tehnologia șlamului dens, care reflectă proprietățile de cimentare/încapsulare a materialului utilizat ca liant, reprezentat de cenușa și reziduul de desulfurare aferente arderii cărbunelui.
- Teste de levigare – determinată prin metoda gravimetrică utilizând aparatul ICP-MS Aurora 90 BUKER. Prin acest set de analize se determină concentrația de metale grele în levigat, care reflectă gradul de solidificare/stabilizare a reziduurilor toxice în matricea rocii de cenușă.

Testele și analizele menționate mai sus s-au desfășurat într-o echipă mixtă de cercetare, cu aparatele din dotarea Institutului de Cercetări pentru Energii Regenerabile – ICER.

6.2.1 Analiza structurii și a formelor de cristalizare

Proprietățile rocii de cenușă ce conține reziduuri toxice sunt comparate în raport cu cele ale rocii de cenușă obținută în varianta industrială, adică fără reziduuri toxice. Spectrul analizei XRD pentru roca de cenușă inițială este prezentat în figura 6.3.

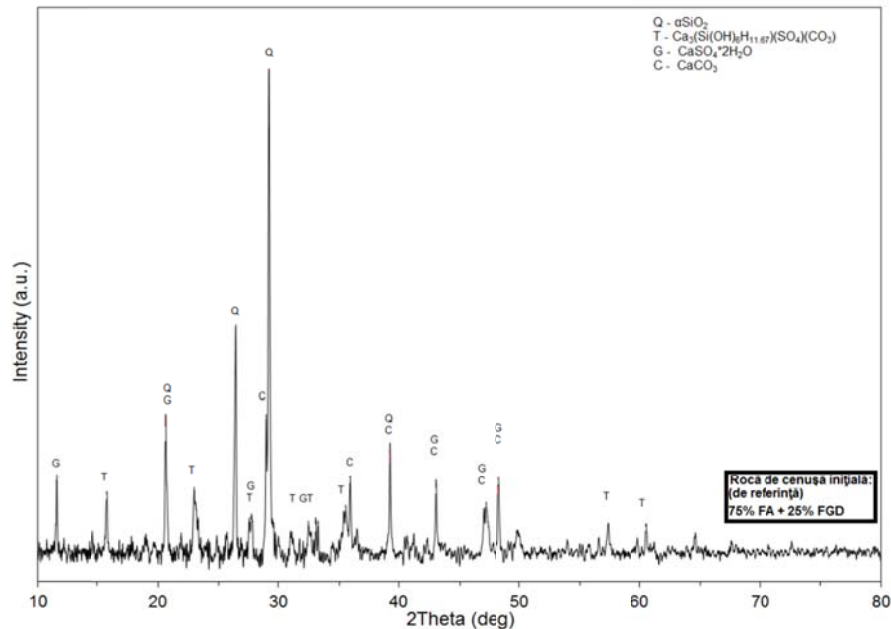
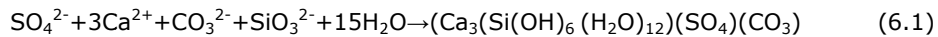


Figura 6.3– Analiza XRD roca de cenușă inițială (de referință)

Din figura 6.3 se observă că roca de cenușă inițială are o matrice formată din: silicați (α SiO_2) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 01-089-8938, sulfatați de calciu (CaSO_4) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 00-021-0816 și carbonați de calciu (CaCO_3) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 01-086-2340. Acești compuși sunt prezenți într-o formă clistalină, fapt care conferă materialului o stabilitate relativ crescută similară cu cea din produselor pe bază de ciment.

În timpul reacțiilor chimice de cimentare sub acțiunea sărurilor de fier, a sulfataților alcalini și a sulfatului de potasiu, are loc formarea unei canități variabile de thaumasit ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 01-075-9144 conform reacției chimice:



Formarea thaumasitului scade caracteristicile mecanice a rocii de cenușă [20], dar nu influențează capacitatea de înglobare/fixare a poluanților în matricea rocii de cenușă. Acest fapt va fi evidențiat în analiza testelor de levigare.

Prin urmare, pe baza acestor caracteristici putem trage concluzia că roca de cenușă poate fi utilizată ca liant pentru stabilizarea metalelor grele.

Spectrele analizei XRD pentru probele investigate sunt prezentate în figura 6.4a-d.

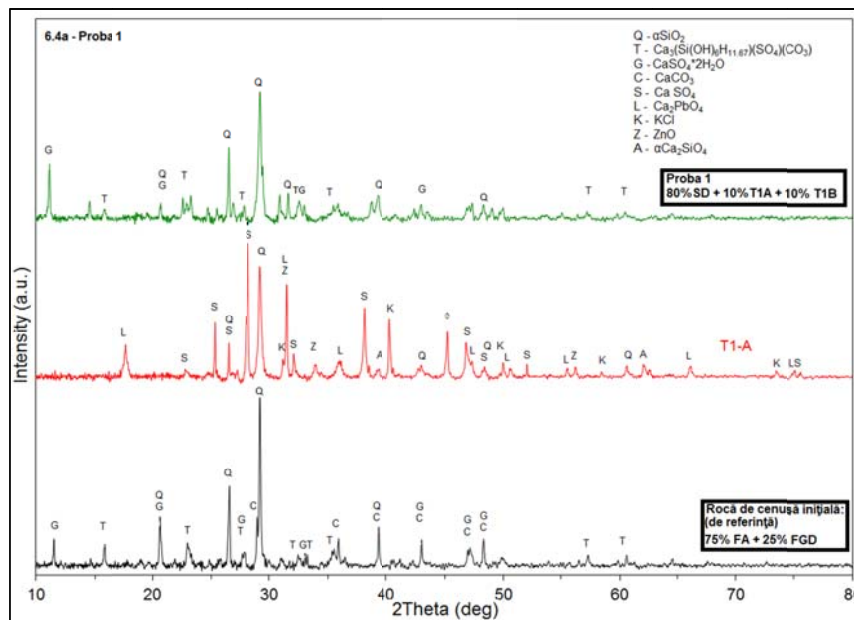


Figura 6.4a- Analiza XRD roca de cenușă – Proba 1

Din figura 6.4a se observă că zgura T_{1B} nu este vizibilă în spectrul de analiză XRD, acest lucru se datorează faptului că T_{1B} este un material vitros care se formează la temperatură înaltă de peste 1000 °C, fiind un material amorf, foarte stabil în condiții de umezeală.

T_{1B} rezultă în urma procesului de sinterizare aplicat prin tehnologia SYNCOM-PLUS de la incineratorul KRV Arnoldstein, unde temperatura de ardere în masa deșeurii pe grătar ajunge până la 1200 °C.

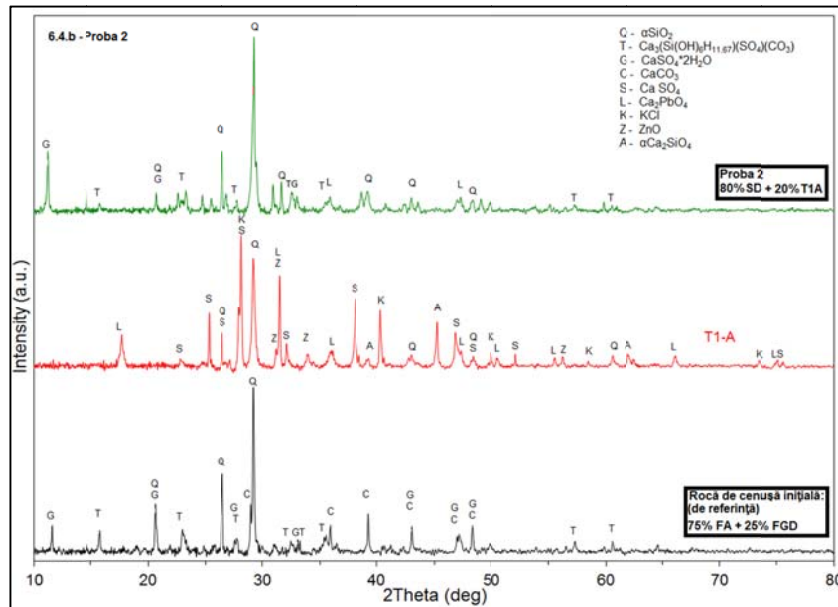


Figura 6.4b- Analiza XRD roca de cenușă – Proba 2

Din figura 6.4b se observă că prin creșterea cantității T1A de la 10% la 20% duce la creșterea concentrațiilor în spectrul Ca_2PbO_4 în comparație cu proba 1. Probele 1 și 2 conțin reziduurile toxice de la același incinerator (grătare mobile).

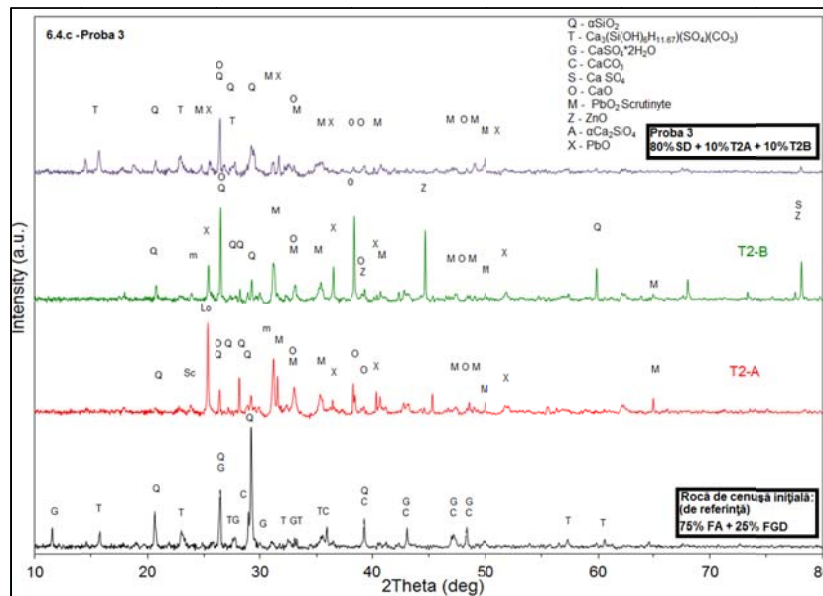


Figura 6.4c- Analiza XRD roca de cenușă – Proba 3

Proba 3 din figura 6.4.c conține reziduu toxic de la o unitate de incinerare în pat fluidizat staționar. Din analiza spectrului se observă că în comparație cu probele anterioare, avem două substanțe în plus: scrutinitul (PbO_2) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 04-008-7672 și oxidul de calciu (CaO) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 01-076-8925.

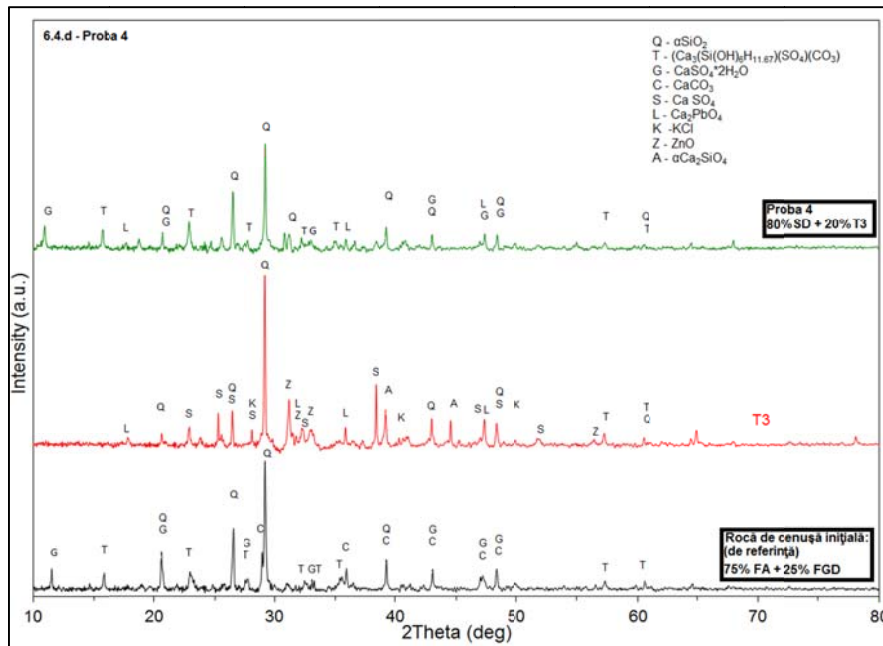


Figura 6.4d- Analiza XRD roca de cenușă – Proba 4

Proba 4 din figura 6.4.d conține reziduu toxic de la o unitate de incinerare în pat fluidizat circulant, iar spectrul XRD este asemănător cu cele din probele anterioare. Concluziile din analiza spectrelor XRD pentru cele 4 probe investigate sunt:

- Prin introducerea reziduurilor toxice în șlamul dens se formează o rocă de cenușă care prezintă forme de cristalizare a unor compuși noi cum sunt: sylvit (KCl) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 00-004-0587, zincit (ZnO) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 04-007-9805, $\alpha\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 01-077-0420 și oxidul de calciu-plumb (Ca_2PbO_4) ICDD (PDF-4+ 2013 RDB) 00-046-0334.
- Similitudinile între cele 4 analize XRD investigate arată că forma de cristalizare a rocii de cenușă nu este influențată de tehnologia de incinerare aplicată, și faptul că roca de cenușă formată prin tehnologia șlamului dens, poate fi utilizată ca material liant pentru stabilizarea unor compuși chimici.

6.2.2 Analiza concentrațiilor de metale grele în levigat

Conform standardului SR-EN 12457-2003, testele de levigare se fac pentru o levigatul colectat după 24 ore de menținere a probei în apă, pentru un raport de lichid/solid de 10/1. Prin urmare am menținut proba imersată în apă timp de 24 ore, după care am filtrat levigatul și l-am supus analizei FRX (vezi fig.6.2). rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.4.

Tabelul 6.4 – Conținutul de metale grele în levigat după 24h

Element	V.M.A*	Valori determinate [mg/kg]			
		Proba 1	Proba 2	Proba 3	Proba 4
As	0.5	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Ba	20	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cd	0.04	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cr_{tot}	0.5	0.2	<0.001	0.7	1
Cu	2	0.4	<0.001	0.4	<0.001
Hg	0.01	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Mo	0.5	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Ni	0.4	0.7	<0.001	0.4	0.4
Pb	0.5	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Sb	0.06	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Se	0.1	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Zn	4	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cl⁻	800	2118.57	2986.53	671	447
F⁻	10	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
SO₄²⁻	1000	40.65	8.49	187.21	28.57

*V.M.A – valori maxime admise conform Ministerului de Mediu Ordinul Nr.95 din 12/02/2005, pentru materiale inerte

Conform valorilor din tabelul 6.4, doar câteva elemente depășesc valorile maxime admise pentru categoria de deșeurii inerte. Pentru investigarea evoluției în

6.2 - Rezultatele testelor de analiză pentru probele investigate 127

timp în ce privește stabilitatea rocii de cenușă și a contaminării levigatului cu metale grele, am repetat analizele la 7, 14 și 28 de zile. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.5.

Tabelul 6.5 – Variația în timp a concentrației de metale grele în levigat

Rocă de cenușă	Timp expunere	Concentrația poluantului [mg/kg] s.u.*							
		Cr	Cu	Ni	Cd	Pb	Zn	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Proba 1	1 zi	0.2	0.4	0.7	<0.001	<0.001	<0.001	2118.57	40.65
	7 zile	0.2	<0.001	0.4	<0.001	<0.001	<0.001	2015.91	0.17
	14 zile	0.1	0.4	0.4	<0.001	<0.001	<0.001	1791.92	16.17
	28 zile	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	2277.23	11.00
Proba 2	1 zi	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	2986.53	8.49
	7 zile	<0.001	0.4	0.4	<0.001	<0.001	<0.001	3247.85	1.90
	14 zile	<0.001	<0.001	1.4	<0.001	<0.001	<0.001	3527.84	16.17
	28 zile	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	3546.50	1.37
Proba 3	1 zi	0.7	0.4	0.4	<0.001	<0.001	<0.001	671.97	187.21
	7 zile	1	<0.001	1.1	<0.001	<0.001	<0.001	783.96	449.57
	14 zile	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	811.96	513.59
	28 zile	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	839.96	533.67
Proba 4	1 zi	1	<0.001	0.4	<0.001	<0.001	<0.001	447.98	28.57
	7 zile	2.6	<0.001	0.7	<0.001	<0.001	<0.001	531.98	35.00
	14 zile	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	457.98	30.45
	28 zile	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	410.65	46.46
*s.u - substanță uscată									

Conform valorilor din tabelul 6.5 se observă că în timp concentrația de crom și nichel crește după care se readsoarbe în masa rocii de cenușă. Evidențierea acestui fenomen este sintetizată în figura 6.5.

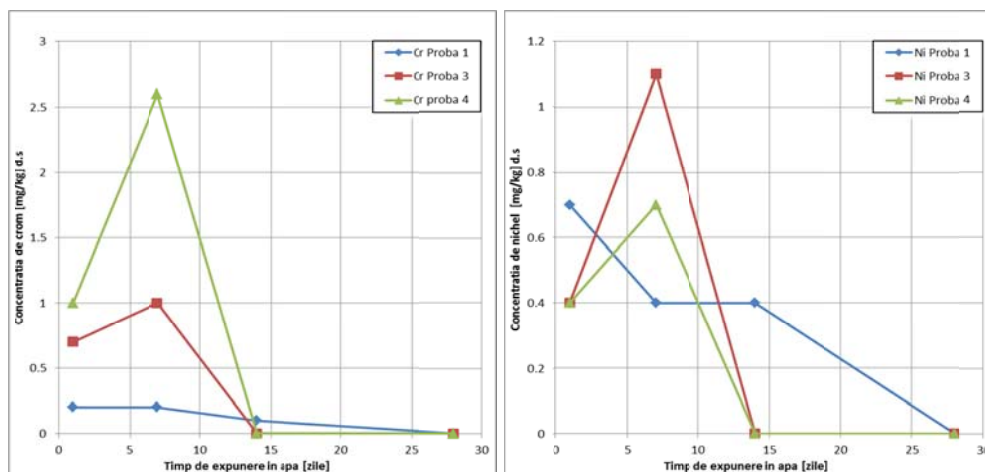


Figura 6.5 – Evoluția Cr și Ni în timp

În urma analizelor am constatat că fenomenul de de readsorbție în roca de cenușă se desfășoară prin adsorbție fizică, care este generată de compuşii pe bază de silicați conținuți în matricea rocii de cenușă, care au proprietăți bune ca material adsorbant. Datorită faptului că roca de cenușă este un material poros, suprafața de adsorbție este foarte mare.

6.3. Interpretarea rezultatelor obținute

Prin interpretarea rezultatelor obținute în urma analizei lor efectuate pe roca de cenușă ce înglobează reziduurile toxice provenite de la unitățile de incinerare a deșeurilor menajere am ajuns la următoarele concluzii:

- Tehnologie de incinerare a deșeurilor menajere (incinerarea în masă sau în pat fluidizat) nu influențează compoziția chimică reziduurilor în ce privește conținutul de metale grele.
- Formarea thaumasitului scade rezistența mecanică a rocii de cenușă, datorită prezenței sulfaților, dar acest lucru nu influențează capacitatea de stabilizare/înglobare a metalelor grele în matricea rocii de cenușă formată prin tehnologia șlamului dens. Acest fapt este susținut de valorile testelor de levigare.
- Potrivit analizei levigatului după 24 ore de expunere în apă, conform valorilor prezentate în tabelul 6.4, am demonstrat capabilitatea rocii de cenușă de a stabili metalele grele prin încapsularea acestora în rețelele cristaline formate în urma reacțiilor chimice de cimentare.
- Proprietățile de adsorbție a rocii de cenușă indică faptul că acest tip de material poate fi folosit ca un material filtrant.

- Prin metoda propusă de tratare a reziduurilor toxice unităților de incinerare a deșeurilor menajere, prin stabilizarea/solidificarea lor în roca de cenușă, se obține un material nou, care conform Ordinului nr.95 din 12.02.2005, reprezintă un material inert, care poate fi depozitat în haldă.
- Metoda de solidificare/stabilizare propusă poate fi o privită ca o metodă ecologică de depozitare în haldă a reziduurilor aferente procesului de incinerare a deșeurilor, prin faptul că reduce infiltrarea apei meteorice în masa de material depozitat și astfel minimizează fenomenul de levigare prin masa depozitului.

6.4. Aplicabilitatea rezultatelor obținute

Având în vedere proprietățile fizico-chimice ce caracterizează roca de cenușă obținută prin tehnologia șlamului dens, se pot dezvolta concepte noi în ce privește metodele de depozitare în haldă (depozite de suprafață) a reziduurilor eferente incinerării deșeurilor menajere.

Aplicarea metodei propuse, poate fi ușor implementată, în ipoteza construirii unităților de incinerare a deșeurilor menajere, în vecinătatea sau pe platforma industrială a unor termocentrale ce funcționează pe cărbune. Astfel se asigură materialul liant reprezentat de cenușa și reziduul de desulfurare din porcesul de ardere al cărbunelui respectiv din tratarea gazelor.

Depozitarea produselor arderii sub formă de șlam dens, se reduce costul cu transportul și tratarea acestor tipuri de reziduuri, în plus caracteristicile fizico-chimice a depozitului de suprafață astfel creat, sunt net superioare variantelor clasice.

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PROPRI

7.1. Atingerea obiectivelor de cercetare științifică propuse

Cercetarea științifică aplicată și experimentală privind valorificarea energetică a deșeurilor menajere are ca bază caracteristicile combustibile ale deșeurilor menajere cuantificate prin puterea calorică inferioară netă (NCV – Net calorific value). În acest scop s-au stabilit obiectivele urmărite, prezentate în subcapitolul 1.4, care vizează metode de exploatare/valorificare energetică, aplicate atât pentru deșeurile provenite din depozitele existente cât și pentru instalațiile de incinerare, în baza fluxului de deșeuri menajere generat.

Toate obiectivele preliminate au fost atinse în totalitate, prin:

- abordarea a patru studii de caz;
- prin teste și analize experimentale efectuate pe stand în laboratoarele UPT (Centrul de Cercetări pentru Mașini și Echipamente Termice, Transporturi și Combaterea Poluării și Institutul de Cercetări pentru Energii Regenerabile).

Studiile de caz abordează:

1. Captarea biogazului de la depozitul pentru deșeuri menajere Pata Rât din județul Cluj – s-a aplicat metoda de captare activă;
2. Captarea biogazului de la depozitul pentru deșeuri menajere Dej din județul Cluj – s-a aplicat metoda pasivă;
3. Studiul fluxului tehnologic aferent incineratorului pentru deșeuri menajere de la KRV Arnoldstein Austria – prin metode analitice, ca urmare a efectuării unui stagiu de practică prin programul Erasmus;
4. Studiul fluxului tehnologic aferent incineratorului pentru deșeuri menajere din Timișoara – prin metoda de analiză a propunerii tehnice acceptată pentru implementare.

Pentru efectuarea cercetării experimentale, s-a proiectat și realizat standul experimental mixer hidraulic (prezentat în subcapitolul 5.3.3), pe baza căruia s-a putut dezvolta un nou concept de tratare a reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor menajere, bazat pe metoda de stabilizare/solidificare prin aplicarea tehnologiei de șlam dens.

Obiectivele stabilite tratează probleme de maximă actualitate privind atât valorificarea energetică a deșeurilor menajere sub conceptul Waste-to-Energy, cât și tratarea reziduurilor aferente procesului de incinerare, în vederea reducerii impactului de poluare asupra mediului înconjurător.

În acest sens, concluziile stabilite se împart în patru categorii principale:

A. Concluzii legate de obiectivele cercetării teoretice

S-au analizat sub aspect tehnic și critic soluțiile și tehnicile pentru tratarea și valorificarea energetică a deșeurilor menajere, aplicate și implementate la nivel global și european. În acest sens s-au identificat (i) *caracteristicile și metodele de*

tratate termică a deșeurilor menajere (subcapitolele 2.2.2, 4.1, 4.2, 4.3 și 4.4), (ii) *metode de tratare a reziduurilor rezultate în urma incinerării* (subcapitolele 2.3, 5.1, 5.2 și 5.3), precum și (iii) *reducerea impactului poluator generat de depozitele de deșeuri existente* (subcapitolele 2.2.1, 3.1 și 3.2).

Pentru acestea, s-au prezentat și aplicat metode de captare a gazului de depozit și porcedeele de calcul pentru estimarea cantității de biogaz produs. Pe baza unei selecții de bibliografie din fluxul actual al cunoașterii, s-au prezentat modul de abordare și conceptul de proiectare a sistemelor de captare biogaz utilizate pe plan mondial, calculându-se punctual cantitățile de gaz de depozit.

Pentru a putea gestiona tratarea termică a deșeurilor menajere ca proces s-au evaluat compoziția chimică a deșeurilor menajere și corelat cu modalitățile de calcul pentru puterea calorifică conținută în masa acestora.

Astfel au fost prezentate metode de calcul pentru estimarea cantităților de deșeuri menajere produse de așezările urbane, respectiv a compoziției lor, funcție de numărul de locuitori, cu specific pentru România. Puterea calorifică și cantitatea deșeurilor menajere constituie valori de bază pentru dimensionarea și proiectarea unităților de valorificare energetică a deșeurilor menajere.

Pentru evidențierea modului de control și reducere a emisiilor poluante generat de tratarea termică, am prezentat mecanismul procesului de ardere prin descrierea etapelor și reacțiilor chimice specifice procesului de incinerare.

Procesul de tratare termică prin incinerare constituie o metodă de tratare pentru o gamă foarte largă de deșeuri. Incinerarea reprezintă procesul controlat al arderii prin care se reduce fracția combustibilă conținută în masa deșeurilor, datorată reacțiilor chimice de ardere, în aceste condiții masa combustibilă trece în materie volatilă, vapori de apă și particule solide vitroase necombustibile, care, ulterior pot fi procesate/tratate sau depozitate în haldă în condiții ecologice.

Reziduurile rezultate în urma procesului de incinerare al deșeurilor menajere constituie factorul major în ceea ce privește poluarea mediului. Din cantitatea totală de reziduuri produsă, zgura reprezintă cantitatea cea mai însemnată, dar principalul poluator îl reprezintă cantitățile de reziduuri provenite de la stația de tratare a gazelor de ardere, întrucât aceste captează și concentrează poluanții conținuți în substanțele care alcătuiesc deșeurile.

Se cunoaște că, indiferent de metoda aplicată pentru tratarea/epurarea gazelor de ardere, speciile poluante și cantitățile lor rămân același. Sub acest aspect s-au prezentat și analizat metodele de tratare existente la ora actuală, precum și modul de poluare/contaminare a mediului înconjurător pentru depozitele în haldă, ce conțin astfel de reziduuri.

B. Concluzii legate de obiectivele cercetării aplicate privind captarea și neutralizarea biogazului produs în depozitele de deșeuri menajere existente

Atingerea obiectivelor propuse în ce privește depozitele de deșeuri menajere existente se cuantifică prin *realizarea studiilor de caz 1 și 2*, care tratează închiderea gropilor de gunoai neconforme de la Pata Rât și Dej (subcapitolele 3.3 și 3.4). Astfel, pe baza studiului bibliografic și al metodelor de calcul prezentate și analizate în cercetarea teoretică, *s-au realizat breviare de calcul*, având datele de intrare conforme cu cerințele impuse prin caietul de sarcini pus la dispoziție de autoritățile în domeniu din județul Cluj.

În urma calculelor, în funcție de *cantitatea de biogaz estimată*, s-a decis care ar fi *cea mai indicată metodă de captare a biogazului*, aplicabilă pentru fiecare depozit de gunoi în parte. Astfel, pentru depozitul de la Pata Rât s-a propus implementarea

metodei active iar pentru cel de la Dej metoda pasivă. În ambele cazuri, captarea gazului de depozit necesită închiderea depozitului de deșeuri astfel încât să se realizeze o fermentare anaerobă în întreaga masă de deșeului, și să se prevină eliminarea necontrolată în atmosferă a gazului generat, în mare parte metan, gaz cunoscut ca generator de efect de seră, în afara faptului că este un combustibil gazos cu valoare energetică ridicată.

Metoda activă constă în *realizarea unui sistem de captare gaz de depozit*, ce cuprinde sonde de extracție a biogazului, sisteme de colectare și transport gaz și stația de tratare/neutralizare a gazului de depozit.

Metoda pasivă este mult mai simplă din punct de vedere tehnic. Se constituie doar din sondele de extracție, care sunt mult mai simplu de realizat tehnic decât cele utilizate în metoda activă.

Modul explicit de calcul, proiectare și dimensionare pentru captarea și neutralizarea gazului de depozit sunt prezentate în detaliu în capitolul 3, cu concluziile aferente.

C. Concluzii legate de obiectivele cercetării aplicate privind valorificarea energetică a deșeurilor menajere prin tratare termică

Concluziile cu referire la tratarea termică a deșeurilor menajere se bazează pe *realizarea studiilor de caz 3 și 4*, care studiază unitatea de incinerare de la KRV Arnoldstein-Austria și respectiv de la CET Sud Timișoara (subcapitolele 4.5 și 4.6).

Studiul incineratorului KRV Arnoldstein a fost realizat ca urmare a *efectuării unui stagiu de practică a autorului tezei*, care astfel, a avut posibilitatea/șansa de a analiza „on-site” întregul proces de tratare termică și de a colecta date certe din baza de date de exploatare a unității de incinerare.

Pe baza informațiilor și a datelor colectate din camera de comandă a incineratorului și a documentațiilor primite de la personalul unității, s-au conceput breviate de calcul conform normativelor europene în vigoare, care impun monitorizarea eficienței energetice specifice cu precădere. În acest sens *s-au calculat indicatorii energetici care reflectă performanță și eficiența energetică* cuantificați prin puterea calorifică netă a deșeurilor incinerate (NCV), eficiența incineratorului (Pl_{ef}) și eficiența energetică a unității de incinerare (R1).

Incineratorul de la KRV Arnoldstein, este dotat cu *tehnologie foarte modernă (BAT)* în ceea ce privește incinerarea deșeurilor, având implementat un sistem de îmbogățire cu oxigen a aerului primar de ardere, care *susține arderea completă* a masei de deșeu incinerat, *minimizând pierderile cu particule narse în reziduuri*.

Tot de la această unitate de incinerare *s-au eșantionat probe de reziduuri aferente incinerării deșeurilor*, utilizate în experimentele realizate pe standul conceput (Mixer Hidraulic).

Studiul incineratorului de la CET Sud Timișoara a fost realizat pe baza propunerii tehnice acceptate pentru implementarea proiectului de valorificare energetică a deșeurilor menajere din Timișoara.

Astfel analiza procesului tehnologic s-a bazat pe valorile utilizate în proiectarea și dimensionarea unității de incinerare. Spre deosebire de incineratorul de la CET Sud Timișoara, incineratorul de la KRV este deja funcțional la parametri optimizați. Unitatea de incinerare CET Sud este proiectată pentru a utiliza și un combustibil secundar – biocoal, provenit din fermentarea fracției biodegradabile a deșeurilor menajere organice.

Propunerea de localizare a incineratorului este platforma industrială de la CET Sud Timișoara, termocentrală care funcționează pe cărbune, fiind dotată cu tehnologie de șlam dens și desulfurare uscată.

Prezentarea, descrierea și analiza unităților de incinerare sunt detaliate explicit în subcapitolele 4.5 respectiv 4.6.

D. Concluzii legate de obiectivele cercetării experimentale privind metoda de tratare a reziduurilor aferente incinerării deșeurilor menajere prin metoda de stabilizare/solidificare

Atingerea obiectivelor propuse în ceea ce privește tratarea reziduurilor eferente procesului de incinerare a deșeurilor menajere, a fost posibilă prin realizarea unui set de experimente efectuate pe standul Mixer Hidraulic, proiectat în concepție originală și realizat în cadrul cercetării doctorale (subcapitolul 5.3 și capitolul 6).

Studiul experimental constă în demonstrarea viabilității unui concept de tratare prin stabilizarea/solidificarea a reziduurilor aferente în roca de cenușă obținută, aplicând și tehnologia șlamului dens utilizată la termocentralele pe cărbune.

Metoda constă în integrarea reziduurilor de incinerare a deșeurilor în rețeta de șlam dens, formată pe baza cenușii de electrofiltru și a reziduurilor de desulfurare aferente arderii cărbunelui. Rezultatul final al acestei metode constă în cimentarea în reziduurilor de incinerare în roca de cenușă obținută prin tehnologia șlamului dens.

S-a demonstrat că materialul liant care constituie baza formării rocii de cenușă îl reprezintă cenușă și produsele de desulfurare rezultate în urma arderii cărbunelui. În acest scop, s-au folosit reziduuri de ardere prelevate de la incineratoare de deșeuri menajere ce utilizează tehnologii diferite (ardere pe sisteme cu grătare mobile și, respectiv, ardere în pat fluidizat staționar și circulant).

Metoda experimentală, materialele utilizate, analizele de laborator și rezultatele obținute sunt prezentate în detaliu în capitolul 6.

7.2. Concluzii privind rezultatele cercetării efectuate

În urma activității de cercetare teoretică, aplicată și experimentală desfășurate pe parcursul celor 3 ani de studii doctorale pe tema valorificării energetice și de tratare a reziduurilor aferente procesului de incinerare a deșeurilor menajere, se conturează următoarele concluzii:

- Deșeurile menajere pot fi exploatate energetic foarte eficient prin utilizarea unor tehnologii de ardere adecvate. În acest scop conceptul Waste-to-Energy oferă soluții fezabile pentru implementare la scară industrială foarte eficiente.
- Depozitele de deșeuri existente reprezintă o sursă cu potențial de valorificare energetică. Gazele emise de aceste depozite constituie o sursă de poluare a atmosferei astfel tratarea prin valorificare/neutralizare este obligatorie, în caz că nu sunt captate.
- Pentru dimensionarea sistemului de colectare și transport al biogazului captat se recomandă utilizarea unor programe de calcul gazo-dinamic dedicate (ca de exemplu cele utilizate Fluid Flow și LandGEM), ce conferă atât rapiditate cât și precizie ridicată a valorilor obținute.

- Capacitatea de extracție a sondelor instalate trebuie să fie mai mare decât cantitatea totală estimată de biogaz produs, cu scopul de a acoperi vârfurile de producție din sezonul cald.
- S-a dovedit că tratarea termică prin incinerare este o soluție viabilă și fezabilă, care reduce volumul deșeurilor depozitate cu 90% și totodată permite igienizarea acestora.
- Găsirea unei soluții optime de valorificare energetică a deșeurilor este o problemă complexă fiind influențată preponderent de structura deșeurilor, ce se bazează pe datele disponibile despre caracteristicile deșeurilor. Sistemul de colectare, transport și depozitare al deșeurilor constituie un factor important în ceea ce privește alegerea soluției optime.
- Oricare dintre procedeele alese pentru tratarea termică a deșeurilor menajere implică un impact mai redus asupra mediului, comparativ cu lipsa oricărui tratament și depozitarea directă în haldă.
- Soluția optimă stabilită trebuie să țină cont de eficiența și rezultatele obținute prin fiecare proces în parte astfel încât să se asigure atingerea obiectivelor principale urmărite.
- Optimizarea procesului de ardere are un rol important în creșterea eficienței energetice a valorificării deșeurilor și reducerea concentrațiilor de poluanți în reziduurile aferente, prin distrugerea dioxinelor și furanilor la temperatură înaltă.
- Îmbogățirea cu oxigen a aerului primar de ardere influențează în mod pozitiv procesul de ardere a deșeurilor, prin reducerea conținutului de particule nearse în reziduurile aferente procesului de incinerare, care se reflectă în creșterea eficienței energetice și conținutul scăzut de carbon organic (TOC) în zgură.
- Sinterizarea cenușii grosiere captată din punctele de colectare aferente generatorului de abur, prin reintroducerea ei în masa deșeurilor incinerate, are ca rezultat obținerea unei zguri vitroase foarte stabile în condiții de umiditate, ca urmare zgura poate fi depozitată în haldă fără probleme.
- Tratarea termică prin incinerarea în masă pe sisteme de ardere cu grătare mobile reprezintă cea mai bună tehnologie pentru valorificarea energetică a deșeurilor menajere în amestec (nesortate).
- Tehnologia de incinerare a deșeurilor menajere (incinerarea în masă sau în pat fluidizat) nu influențează compoziția chimică a reziduurilor în ceea ce privește conținutul de metale grele.
- Există soluții ecologice de tratare a reziduurilor aferente incinerării deșeurilor care minimizează și reduc emisiile poluante în mediu (BAT) și acestea sunt aplicabile și în România.
- Utilizarea ca material liant a cenușii și reziduurilor de desulfurare provenite din arderea cărbunelui, pentru tratarea prin solidificare/stabilizare a reziduurilor

aferente incinerării deșeurilor s-a dovedit o soluție de viitor în ceea ce privește depozitarea ecologică în haldă a acestor reziduuri.

- Reziduurile aferente procesului de desulfurare din tratarea gazelor de ardere au un rol important în stabilitate/solidificarea rocii de cenușă, datorită conținutului de compuși pe bază de calciu, care activează și accelerează reacțiile chimice de cementare a elementelor pozzolanice din cenușa de cărbune.
- Creșterea cantității de reziduuri de desulfurare în rețea de șlam dens conduce la îmbunătățirea proprietăților fizico-chimice a materialului depozitat, rezultând astfel minimizarea fenomenului de levigare specific depozitelor în haldă.
- Formarea thaumasitului scade rezistența mecanică a rocii de cenușă, datorită prezenței sulfaților, acest lucru nu influențează însă capacitatea de stabilizare/înglobare a metalelor grele în matricea rocii de cenușă formată prin tehnologia șlamului dens. Concluzia trasă susținută de valorile testelor de levigare.
- Potrivit analizei levigatului după 24 ore de expunere în apă, conform valorilor prezentate în tabelul 6.4, s-a demonstrat capacitatea rocii de cenușă de a stabiliza metalele grele prin încapsularea acestora în rețelele cristaline formate în urma reacțiilor chimice de cementare.
- Proprietățile de adsorbție a rocii de cenușă indică faptul că acest tip de material poate fi folosit ca un material filtrant.
- Aplicând metoda propusă de tratare a reziduurilor toxice unităților de incinerare a deșeurilor menajere, prin stabilizarea/solidificarea lor în roca de cenușă, se obține un material nou, care conform Ordinului nr.95 din 12.02.2005, reprezintă un material inert, care poate fi depozitat în haldă fără risc major.
- Metoda de solidificare/stabilizare propusă poate fi o privită ca o metodă ecologică de depozitare în haldă a reziduurilor aferente procesului de incinerare a deșeurilor, prin faptul că reduce infiltrarea apei meteorice în masa de material depozitat și astfel minimizează fenomenul de levigare prin masa depozitului.

7.3. Direcțiile de cercetare rămase deschise pentru continuarea cercetărilor

În urma cercetării științifice efectuate în prezenta teză de doctorat privind valorificarea energetică a deșeurilor menajere s-au abordat două subiecte principale legate de tratarea termică prin incinerarea deșeurilor menajere respectiv tratarea reziduurilor aferente incinerării deșeurilor menajere prin metoda de stabilizare/solidificare.

Se consideră că direcțiile de cercetare rămase deschise pentru primul subiect abordat sunt legate de eficientizarea fluxului tehnologic ce caracterizează întreaga unitate de incinerare a deșeurilor. .

S-a ajuns la această concluzie prin analizarea bilanțurilor energetice aferente incineratorului KRV Arnoldstein pentru o perioadă de 5 ani (vezi Anexa 1). Dacă se analizează evoluția energiei introduse în sistem pentru producerea aburului E_f și cea introdusă în sistem fără producere abur E_i , se constată că acestea au un trend descrescător – figura 7.1.

Energia E_f reprezintă energia termică introdusă în sistem prin utilizarea combustibilului auxiliar utilizat la secvențele de pornire/oprire fiind considerată aport de energie pentru producerea aburului.

Energia E_i reprezintă energia termică și electrică introdusă în sistem din afara unității de incinerare, adică cumpărată.

Explicația se bazează pe modul și procedeul de calcul a bilanțurilor energetice pentru determinarea eficienței energetice R_1 , pentru unitățile de incinerare a deșeurilor menajere impuse prin Directiva Europeană – Directive 2008/98/EC on Waste.

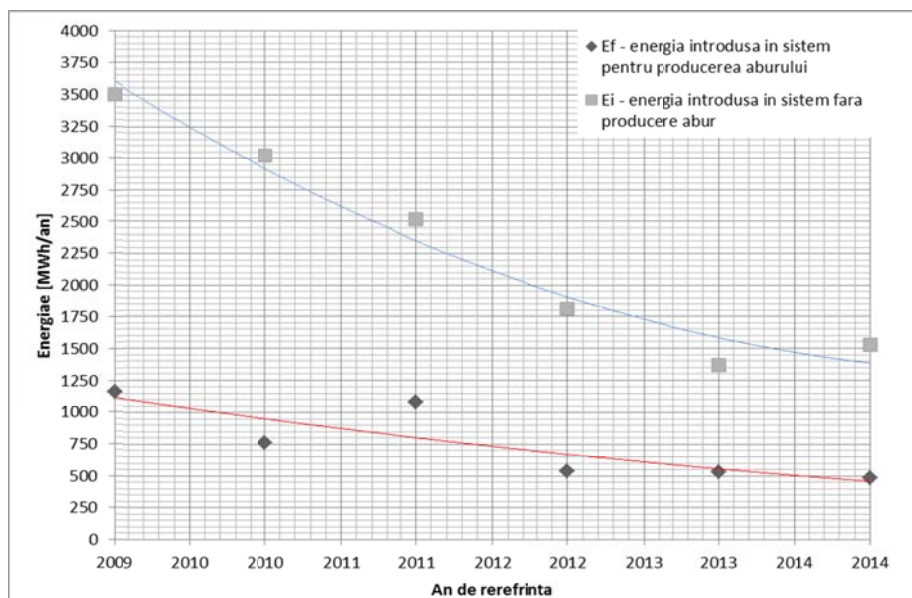


Figura 7.1- Evoluția energiilor introduse în sistem E_f și E_i

Energia termică conținută de E_i este generată de cantitatea de combustibil auxiliar folosit în cazul în care este necesară menținerea temperaturii optime de ardere, dacă aceasta nu poate fi asigurată din arderea deșeurilor. Energia electrică conținută de E_i este asociată cu energia electrică intrată în sistem din afara unității de incinerare, care de regulă se întâmplă în perioada de mentenanță, când unitatea nu funcționează (vezi figura 2.5 subcapitolul 2.2.2).

Trendul descrescător al acestor energii se datorează eficientizării și optimizării continue a fluxului tehnologic aferent întregii unități de incinerare. Acest fapt a fost confirmat de rezultatele obținute prin exploatarea incineratorului KRV. Conform informațiilor obținute „on-site”, optimizările fluxului tehnologic au constat în:

- modificarea modului de curățire periodică a schimbătoarelor de căldură;
- modificarea camerei de ardere în zona sistemului de grătare prin înlocuirea tipului de cărămidă refractară;
- modificarea camerei de ardere în zona tamburului, la prima schimbare a direcției de curgere a gazelor de ardere, prin înlocuirea materialului utilizat în confecția pereților membrană, cu un material mult mai rezistent la coroziune;
- montarea unui turboagregat dotat cu o turbină cu abur cu pornire rapidă, astfel în surplusul de abur, care apare în special în perioada caldă a anului, este transformat în energie electrică și vândut sau utilizat pentru consumul intern.

Acest fapt se reflectă și în cantitatea utilă de energie produsă de unitatea de incinerare E_p , care are un trend descrescător – figura 7.2.

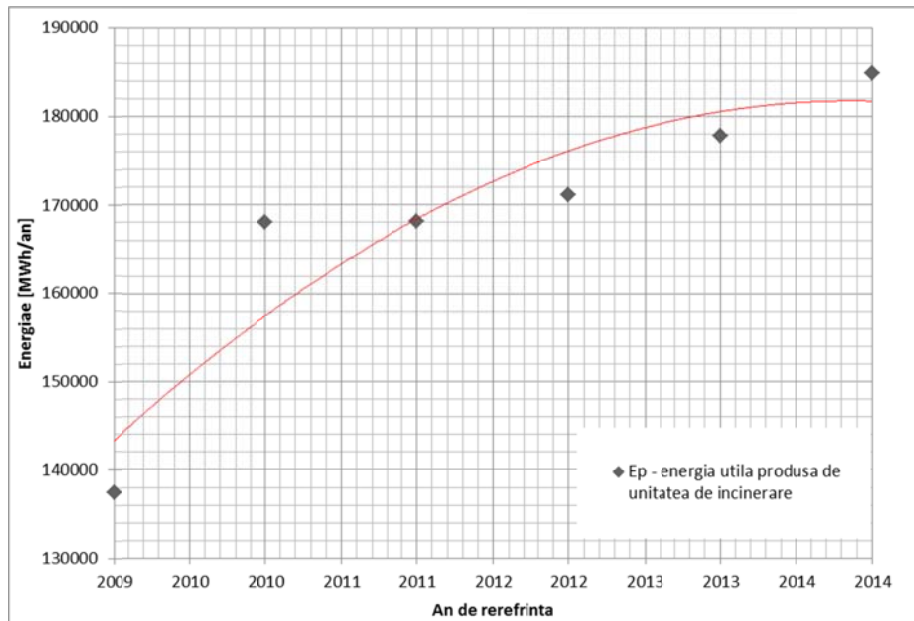


Figura 7.2– Evoluția energiei utile produsă de unitatea de incinerare E_p

Creșterea energiei totale produse de unitatea de incinerare și scăderea concomitentă a energiei utilizată pentru consumul intern al unității de incinerare duc implicit la creșterea performanței energetice R1, după cum se observă din figura 7.3.

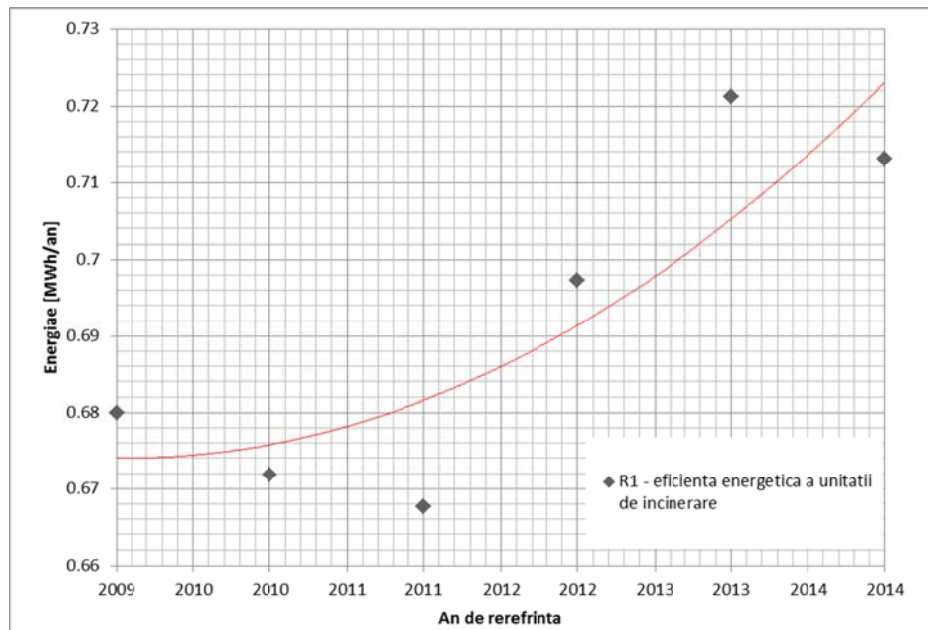


Figura 7.3– Evoluția eficienței energetice R1 - incineratorul KRV Arnoldstein

Ca și concluzie finală referitoare la direcțiile deschise pentru cercetare în ceea ce privește optimizarea fluxului tehnologic de incinerare al deșeurilor menajere, s-a demonstrat că acestea pot fi valorificate pe fiecare etapă din fluxul tehnologic.

În ce privește direcțiile rămase deschise pe subiectul de tratarea prin stabilizarea/solidificarea reziduurilor aferente incinerării deșeurilor menajere prin metoda șlamului dens, aceasta este încă la început, chiar și pe plan european. Rezultatele obținute experimental în decursul cercetării efectuate sunt promițătoare și pot fi privite ca o metodă de viitor, posibilă de implementat la scară industrială.

În urma testelor de levigare s-a demonstrat că roca de cenușă, ce conține reziduurile provenite din incinerare, poate reține în matricea sa metalele grele și are proprietăți fizico-chimice ce reduc semnificativ fenomenul de levigare (vezi subcapitolele 6.2.2 și 6.3).

Având în vedere posibilitatea construirii unui incinerator pentru deșeurii menajere pe platforma CET Sud Timișoara, autorul speră ca în viitorul apropiat, să poată continua cercetările în acest scop.

7.4. Contribuții propri referitoare la tema cercetată

Pornind de la cercetarea științifică teoretică efectuată pe parcursul studiilor de doctorat și nu numai, s-au abordat mai multe metode de cercetare aplicată și experimentală pentru a putea face o evaluare pertinentă, critică și actualizată a posibilităților de valorificare energetică a deșeurilor menajere precum și de tratare a reziduurilor aferente incinerării deșeurilor, evaluare pe baza căreia se pot trage concluzii pertinente.

Temele de cercetare abordate sunt de mare interes la nivel internațional, european și în ultimii ani și la nivel național. Se răspunde la Directiva Europeană Nr.33/2003/EEC care, indică că, începând cu anul 2009 se interzice depozitarea în haldă a deșeurilor menajere fără o tratare prealabilă corespunzătoare. Singura metodă de valorificare în contextul protejării mediului dar și a nevoilor crescânde de energie termo-energetică rămâne valorificarea energetică, cu alte cuvinte transformarea conținutului de materie combustibilă din deșeuri în sursă de energie.

În România, deși sunt investiții vizibile în progres de construire a haldelor de deșeuri pe lângă marile orașe din păcate nu se valorifică emisia de metan ce ar putea fi captată. Încineratoarele de deșeuri sunt încă un deziderat, având în vedere că grupurile bazate pe ele ar trebui să fie optimizate și să funcționeze în cogenerare.

Dacă se face o analiză a modului de exploatare energetică a deșeurilor menajere pentru țările cu o economie sănătoasă, se observă că în aceste state (Germania, Austria, Suedia, Danemarca, Franța, U.K) sunt majoritatea unităților de incinerare a deșeurilor menajere de pe teritoriul Europei. Acest lucru ar trebuie să ne pună semne de întrebare, și să profităm de „know-how”-ul acestor state, implementând și în țara noastră astfel de unități energetice. În plus noile norme europene impun și stimulează tratarea și valorificarea energetică a deșeurilor menajere.

În lucrarea de față au fost tratate tocmai teme legate de tratarea și valorificare deșeurilor menajere, prin cercetarea a trei aspecte principale:

1. Calculul și captarea emisiilor de metan (biometan) din depozitele românești;
2. Valorificarea energetică a deșeurilor în incineratoare;
3. Depozitarea în condiții ecologice a reziduurilor aferente procesului de incinerare al deșeurilor menajere.

În acest context, s-au finalizat patru studii de caz care tratează aceste teme, două pentru captarea biogazului și două pentru incinerarea deșeurilor.

În plus s-a dezvoltat și propus o metodă originală și un concept inovator în ceea ce privește tratarea reziduurilor aferente incinerării deșeurilor prin aplicarea tehnologiei de șlam dens. Tehnologia nouă a fost testată pe un stand pilot de laborator în concepție și realizare proprie.

Contribuțiile referitoare la tema de cercetare prezentată, sunt următoarele:

A. Cu referire la cercetarea științifică teoretică:

- Întocmirea unei scurte sinteze (în baza fluxului internațional al cunoașterii pe ultimii 8 ani, în majoritate) privind metodele de valorificare energetică a deșeurilor menajere prin tratare termică și captarea biogazului generat de depozitele de deșeuri menajere existente (subcapitolele 2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 5.1, 5.2);

- Întocmirea unor breviate de calcul (cu criteriu de atestare a viabilității/rentabilității) pentru calculul termo- și gazodinamic al sistemelor de colectare a gazului (biometan) de depozit în vederea valorificării energetice sau neutralizării acestuia (subcapitolele 3.3 și 3.4);
- Întocmirea breviarelor de calcul pentru puterea calorifică netă a deșeurilor (NCV), eficiența incineratorului (PI_{ef}) și eficiența energetică a unității de incinerare (R1) (subcapitolul 4.6.4);
- Întocmirea unei sinteze pentru procedeele de tratare termică a deșeurilor prin incinerare în sisteme de ardere în masă pe gătare mobile, în sisteme de ardere în pat fluidizat și în cuptoare rotative (subcapitolele 4.2, 4.3 și 4.4);
- Descrierea și prezentarea mecanismului de ardere, coroborat cu modul de producere și formare a poluanților pe fiecare fază de ardere (subcapitolul 4.1);
- Sintetizarea metodelor de tratare a reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor menajere (subcapitolele 5.1 și 5.2);

B. Cu referire la cercetarea științifică aplicată:

- Studiul și analiza procesului de fermentare anaerobă aferentă depozitelor de deșeuri menajere în scopul captării gazului de depozit produs (subcapitolul 2.2.1);
- Proiectarea și dimensionarea sistemului de captare gaz de depozit prin metoda activă pentru depozitul de deșeuri de la Pata Rât (subcapitolul 3.3);
- Proiectarea și dimensionarea sistemului de captare gaz de depozit prin metoda pasivă pentru depozitul de deșeuri de la Dej (subcapitolul 3.4);
- Proiectarea și dimensionarea sondelor de extracție a gazului de depozit prin metoda activă și metoda pasivă de extracție;
- Studiul și analiza fluxului tehnologic aferent procesului de incinerare a deșeurilor menajere de la incineratorul KRV Arnoldstein (subcapitolul 4.5);
- Calculul și analiza indicatorilor de performanță energetici (NCV), (PI_{ef}) și (R1) pentru unitatea de incinerare de la KRV Arnoldstein (vezi tabelele 7.1, 7.2 și 7.3);
- Studiul și analiza fluxului tehnologic aferent procesului de incinerare a deșeurilor menajere de la incineratorul CET Sud Timișoara (subcapitolul 4.6);
- Studiul și analiza fenomenului de levigare care se desfășoară la depozitele de suprafață a deșeurilor (subcapitolul 5.1);

- Descrierea și prezentarea conceptului de stabilizare/solidificare a reziduurilor provenite din incinerarea deșeurilor în roca de cenușă prin tehnologia șlamului dens (subcapitolul 5.3);
- Proiectarea, dimensionarea și realizarea standului de laborator mixer hidraulic pentru prepararea șlamului dens (subcapitolul 5.3.3);

C. Cu referire la cercetarea științifică experimentală:

- Determinarea rețetelor de șlam dens pentru metoda de tratare a reziduurilor aferente incinerării deșeurilor menajere prin stabilizare/solidificare în roca de cenușă obținută prin tehnologia șlamului dens (subcapitolul 6.1.2);
- Conceptul și realizarea matrițelor de turnare pentru șlamul dens format după conceptul propus (subcapitolul 6.1.2);
- Analiza compoziției chimice în laborator a cenușilor și reziduurilor aferente incinerării deșeurilor utilizate pentru prepararea rețetei de șlam dens (subcapitolul 6.1.1);
- Analiza și interpretarea rezultatelor obținute prin difracție în raze X a rocii de cenușă obținută prin metoda de solidificare propusă (subcapitolul 6.2.1);
- Evaluarea pe cale experimentală a fenomenului de cimentare desfășurat în formarea rocii de cenușă prin metoda de stabilizare/solidificare propusă (subcapitolul 6.2.2);
- Evaluarea experimentală a fenomenului de levigare asupra rocii de cenușă prin efectuarea testelor de levigare (subcapitolul 6.2.2);
- Evaluarea experimentală a proprietăților de reținere a metalelor grele în matricea rocii de cenușă prin analiza și interpretarea valorilor concentrațiilor de metale grele din levigat după 24 ore (subcapitolul 6.2.2);
- Evaluarea experimentală a evoluției concentrațiilor de metale grele în levigat după prin analiza și interpretarea valorilor concentrațiilor de metale grele după 1, 7, 14 și 28 zile (subcapitolul 6.2.2);
- Realizare unui set de experimente „on-site” la CET Sud Timișoara, utilizând standul proiectat în cadrul prezentei teze de doctorat – mixer hidraulic, pentru determinarea rețetei optime de șlam dens în vederea integrării produselor de desuflare într-o nouă rețetă (de șlam dens), în vederea stabilirii parametrilor optimi de transport hidraulic prin conducte pentru deversarea în depozitul de cenușă de la Utvin.

Bibliografie

1. European Commission, "Integrated Prevention and Control. Reference document on the Best Available Techniques for Waste Incineration", August 2006. Available: <http://ebookbrowse.com>
2. J.Paul Guyer, "Introduction to Solid Waste Incineration", 2011. Available: <https://www.cedengineering.com>
3. Decision Makers' Guide to "Municipal Solid Waste Incineration", 1999, The World Bank, Washington. Available: <http://siteresources.worldbank.org>
4. Environmental Permitting Guidance "The Directive on the Incineration of Waste", October 2009, Available: www.defra.gov.uk
5. R.Lima, R.T. Bachmann, "Pollutant emissions from modern incinerators", 2002. Available: <https://bibliotecadigital.ipb.pt>
6. A. Porteous, "Energy from waste incineration – a state of the art emissions review with an emphasis on public acceptability", Department of Environmental and Mechanical Engineering, The Open University, Walton Hall, Milton Keynes MK7 6AA, UK April 2001
7. S.Sakaia, M. Hiraokab, „Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes”, Waste Management 20 (2000) 249-258, 1999
8. T. Sabbasa, A. Polettinib, R. Pomib, "Management of municipal solid waste incineration residues", Waste Management 23 (2003) 61-88. 2003
9. R. Leithner, A.Wittkowski, "Energie Bilanz Program EnBiPro- Benutzerhandbuch – version 0.6", Institut für Wärme- und Brennstofftechnik, 2012
10. ****Metode și tehnologii de gestionare a deșeurilor-Metode de tratare termică, Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Protecția Mediului – ICIM București, pp. 1-20
11. B. Johnke, R. Hoppaus, E.Lee, "Emissions from waste incineration", Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, pp.456-468, Available: www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_3_Waste_Incineration.pdf
12. P.Kjeldsen, M.A. Barlaz, A. P. Rooker, "Present and Long-Term Composition of MSW LandfillLeachate: A Review", Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 32:4, 297-336, 2013
13. ****Studiu de fezabilitate pentru incinerarea deșeurilor în Timișoara, Institutul de Studii și Proiectări Energetice – ISPE, 2012
14. Marjorie J. Clarke, "Introduction to Municipal Solid Waste Incineration", Air and Waste Management Association Annual Meeting Baltimore, MD, USA, 2002

15. Directiva 2008/98/EC, "Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste"
16. P.Arjunan, M.R. Silsbee, D.M Roy. "Chemical activation of low calcium fly ash. Part II: Effect of Mineralogical composition on alkali activation", International Ash Utilization Symposium, University of Kentucky, Paper #106, (2001)
17. A. PALOMO, A.F. JIMENEZ, "Alkaline activation, procedure for transforming fly ash into new materials. Part I: Applications", World of Coal Ash Conference, Denver, CO, USA, 2011
18. L.J.BANASIAK: The role of a subsurface lime-fly ash barrier in the migration of acid sulphate soils, University of Wollongog, Australia, (2004)
19. J.CHILTON: „Water Quality Assessments – A guide to use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring–Second Edition, Chapter 9 Groundwater”, UNESCO/WHO/UNEP, (1996)
20. ****COALTECH 2020 - PartD „Evaluation of new and emerging mine water treatment technologies”, Evaluation of the Savmin Sulphate Removal Process, 2004
21. Jeffrey J. Chena, Jeffrey J. Thomasb, Hal F.W. Taylor, „Solubility and structure of calcium silicate hydrate”, Cement and Concrete Research 34 pp 1499–1519, 2004
22. H. Yuan, Tao Lu, N. Kobayashi, „The influence of oxigen Concentration and equivalance ratio on Pyrolysis gas in oxigen enriched pyrolysis by theoretocal calculation”, AASRI Procedia, pp 427 – 434, 2012
23. O.Marin, F. Châtel-Pélage, M. Usman Ghani, „Low-oxygen enrichment in coal-fired utility boilers”, The 28th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 10-13, 2003
24. M.Kira, T. Doi, S. Tsuneizumi, „ Development of New Stoker Incinerator forMunicipal Solid Wastes Using Oxygen Enrichment”, Mitsubishi Heay Industries Ltd., Technical review Vol.38 No.2, 2001
25. T.S. McIlvried, W. Allan Scanori, R.G Jenkins, "Oxigen enriched combustion of a coal-water fuel", Fuel Science Program, Atlantic Research Corporation, USA, 1988
26. D.Rue, H.Abbasi, "Demonstration of oxygen-enriched air staging at owens-rockway glass containers", Institute of Gas Technology, USA, 1997

27. S. Ahamparam, S. Harrison, "Oxygen enrichment in desulphurisation", Available: www.eptq.com
28. A. Basumajumdar, A.K. Das, N. Bandyopadhyay, „Some studies on the reaction between fly ash and lime”, Indian Academy of Sciences, Bull. Mater. Sci., Vol. 28, No. 2, pp.131-136, 2005
29. S. Tabin Rushad, K. Abhishek , S. Duggal, „Experimental Studies on Lime-Soil-Fly Ash Bricks”, Internationa Journal of Civil and Structural Engineering, Vol.1, No.4, 2011
30. M.Lalović, Ž. Radović, M. Lalović, "The effect of oxygen enrichment of combustion air on the amount and chemical composition of combustion products", Zbornik radova Tehnološkog fakulteta u Leskovcu, 2011
31. U.S Pattent – Patent No.5052310, "Aolid waste to steam incinerator capacity enhacement by combined oxygen enrichment and liquid quench", 1991
32. U.S Pattent – Patent No.4762074, "Process for the incineration of the combustible materials", 1988
33. M.R.Wächter, I.Ionel, A.Negrea, "Leaching investigation of coal fly ash and dry desulphurisation residues by stabilization into ash rock", Revista de chimie, Vol.66, No.11, 2015
34. M.R.Wächter, I.Neamt, I.Ionel, "Application of oxygen enriched air on grate incinerators", IV International Conference Ecology of Urban Area, Proceedings, Zrenjanin, 2014
35. W. Lan, C. Yuanshen, "The application and Development of Fly ash In China", World of Coal Ash (WOCA), USA, 2007
36. A.C. Wightley, "Slurry pumping manual – A technical application guide for users of centrifugal slurry pumps and pumping systems", 2002
37. ****Vitro Minerals, VCAS White Pozzolans, "Portland Cement and Pozzolans Technical Background for the Effective Use of VCAS Pozzolans in Portland Cement Concrete", Available: www.VitroMinerals.com , 2006
38. A.K. Hadi, H.Ashad, K. Jusoff, "Optimization of Fly Ash and Silica Fume as Materials Subtitution for Cement with Ternary Sistem C-A-S", World Applied Sciences Journal 26, pp.24-30, 2013
39. X. Liu, H. Wen, T.B. Edil, "Stabilization of FGD By-products by using Fly Ash, Cement and Sialite", World of Coal Ash (WOCA), USA, 2009

40. M. Muh-Chen Wu, J. Yabing, S. Qingfa, „Dry FGD By-product Characteristics and Utilization – International Perspective“, Available: www.flyash.info/2013/079-Wu-2013.pdf
41. U.S Environmental Protection Agency, “Coal Combustion Residual Beneficial Use Evaluation: Fly Ash Concrete and FGD Gypsum Wallboard” 2014
42. E.Sobiecka, “Investigating the chemical stabilization of hazardous waste material (fly ash) encapsulated in Portland cement”, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* pp. 1219–1224, 2013
43. ***ISWA – International Solid Waste Association: Management of APC residues from W-t-E Plants, Second Edition, 2008.
44. Ľ. Kozáková, T.Bakalár, M. Zeleňák, “Solidification of MSWI fly-ash with regard to hazardous metals leaching”, *Acta Montanistica Slovaca Ročník 18*, pp.129-139, 2018
45. K. Karlfeldt Fedje, “PhD Thesis – Metals in MSWI fly ash – problems or opportunities?”, Department of Chemical and Biological Engineering Division of Environmental Inorganic Chemistry Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden 2010
46. H.K. Charles Lam, W.M. Alvin Ip, J.P. Bradford, “Use of Incineration MSW Ash: A Review”, Available: www.mdpi.com/journal/sustainability
47. N. Rodella, A. Bosio, R. Dalipi, “Waste silica sources as heavy metal stabilizers for municipal solid waste incineration fly ash”, *Arabian Journal of Chemistry*, 2014
48. ITT Industries, “Slurry handbook – Guidelines for slurry pumping” Available: <http://acsipro.org/sp/guidelines-for-slurry-pumping>
49. Gary Davidson, “Considerations for proper sizing and material selection to optimize centrifugal slurry pump performance”, *Proceedings of the International Pump Symposium 4*, pp. 35-54, 1987
50. H.J.H. Brouwers, R.J. Van Eijk, “Chemical reactions of fly ash”, *Proceeding of the 11th International Congress on the Chemistry Cement (ICCC)* pp. 791-800, 2003
51. E.R. Dustan, “How does pozzolanic reaction make concrete Green? World Coal Ash Conference, Denver, CO, USA. , pp.1-14, 2011
52. A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco, “Alkali-activated fly ashes A cement for the future”, *Cement and Concrete Research* 29, pp.1323–1329, 2009

53. M.R.Wächter, I.Ionel, P.Negrea, "Landfilling of waste incineration residues by stabilization-solidification", Buletinul AGIR nr. 3, Pages 129-133, 2015
54. Mihaela Stoica – Teză doctorat, "Fundamentarea alternativelor de gestionare a deșeurilor menajere", Universitatea București, Facultatea de Biologie, Școala Doctorală în Știința Mediului, 2011
55. Directiva 200/76/CE a Parlamentului European și a consiliului din 4.12.2000 privind incinerarea deșeurilor
56. Tiberiu Apostol, Cosmin Marculescu, "Managementul deșeurilor solide", Asociația Generală a Inginerilor din România – AGIR, 2007
57. European Comission – Directorate General Environment, " Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives – Final Report", 2003
58. ****Porr Umwelttechnik GmbH, "Verfahrens- und Anlagenbeschreibung - Stabilisierung von Reststoffen aus der Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen", 2012
59. J. Dudek, P. Limek, G. Kolodziejak, "Landfill Gas Energy Technologies", Institut Naftyy I Gazu, 2010
60. ****Cascadia Consulting Group, „Waste Disposal and Diversion Findings for Selected Industry Groups“, California Environmental Protection Agency, 2006
61. **** Eurostat – Statistics Explained, "Statistici privind deșeurile, Available:http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics/ro
62. ****U.S Army Corps of Engineers, "Landfill off-gas Collection and Treatment Systems", Engineering and Design, Department of the Army, Washington DC, USA, EM1110-1-4016, 2008
63. I.Ionel, C. Ungureanu, "Centrale termodinamice electrice, Politehnica Timișoara, 2004
64. Mihai Jădăneanț, „Termotehnica și mașini termice“, Vol.I, II, Politehnica Timișoara, 1990
65. W. Betitz, K.H. Grote, „Taschenbuch für den Maschinenbau 19 Auflage“, Dubbel, Springer-Verlag GmbH 1997
66. Brandt Fritz, „Brennstoffe und Verbrennungsrechnung“, Vulkan-Verlag, Essen, 1999

67. ****U.S EPA, „Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide, EPA-600/R-05/047, 2005
68. ****KRV Restmüllverwertungs GmbH – TBA Arnoldstein, „Description of the present status“, 2011
69. ****Date prelevate „on site“ în timpul efectuării stagiului de practică prin programul Erasmus, în perioada 01.06.2014-30.09.2014
70. ****KRV Restmüllverwertungs GmbH – TBA Arnoldstein, „Overview of TBA Incineration Plant“, 2012
71. Deutsche Norm – DIN 1871, „Gasfoermige Brennstoffe und sonstige Gase“, 1999
72. A. Brems, R. Dewil, J. Baeyens, “Gasification of plastic waste as waste-to-energy or waste-to-syngas recovery route”, Scientific Research, DOI: [10.4236/ns.2013.56086](https://doi.org/10.4236/ns.2013.56086), 2013
73. Le Duc Dung, K. Morishita, T.Takarada, “Catalytic Decomposition of Biomass Tars at Low-Temperature”, INTECH, <http://dx.doi.org/10.5772/55356> , 2013
74. E.J. Anthony, “Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status, successes and problems of the technology”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol 21, Issue 3, pp.239-268, 1995
75. Uwe Lahl, “Basics of waste management”, Group of waste management and waste technology| Institut IWAR, 2012
76. ****Umwelt Bundesamt, "Technical Guide on the Treatment and Recycling Techniques for Sludge from municipal Wastewater Treatment with references to Best Available Tehniques (BAT)", 2013
77. J. Sutherland Earle, PhD Thesis, “Rotary kiln incineration of hazardous wastes: pilot scale studies at Louisiana State university”, Louisiana State University, USA, 2003
78. X. Xingguo, L.I. Jiaxin, CAO Tongyou, “Mathematical Model for Rotary Kiln Process and its Application”, Chin.J.Met.Sci.Technol., Vol.7, pp.55-64, 1991
79. H.P. Kritzinger, T.C. Kingsley, „Modelling and optimization of a rotary kiln direct reduction process”, Southern African Pyrometallurgical International Conference, 2006
80. Calvin R. Brunner, “Incinerator System-Selection and Design”, New York, NY: Van Nostrand Reinhold, p.239, 1984

81. F.A. van Vught, G.F. Versteeg, J.A.M. Kuipers, "Modelling of rotary kilns", M.D. Heydenrych, Centurion, South Africa, ISBN 90-36515440, 2001
82. ****Agenția Regională Pentru Protecția Mediului Sibiu, Agenția Autorităților locale și Regionale din Norvegia, "Ghid Privind Depozitarea Deșeurilor Menajere", ISBN 978-973-7749-39-0, 2011
83. Ordin nr.757 din 26 noiembrie 2004, Normativ Tehnic privind depozitarea deșeurilor, Ministerul Mediului și Gospodăririi ăpelor, 2004
84. ****CH2M Hill Canada Limited, "Vancouver Landfill Gas Capture Optimization, City of Vancouver-Delta", 2013
85. C.Kai Wang, G. Achari, "A Comparison of Performance of Landfill Gas Collection Wells with Varying Configurations", Waste Management Journal, pp.40-48, 2012
86. K.S. Brown, W.E. Klister, "Design Procedures for Landfill Gas Interception, Collection, and Extraction Systems Pursuant to the Proposed EPA Regulations for the Control of Landfill Gas." National Waste Management Association Waste Tech '93, Marina del Ray, California, January 1993
87. R.K. Ham, "Landfill Gas Generation: Compositions, Quantities, Field Test Procedures and Uncertainty." University of Wisconsin Sanitary Landfill Leachate and Gas Management Seminar, Madison, WI, December 4-7, 1989.
88. M.P. Peramanki, "Soil-Vapor Extraction System Piping Design and Blower Selection: A Spreadsheet Program." Proceedings of the National Ground Water Association, Outdoor Action Conference, May 1993
89. S.Cavenati, C. A. Grande, T.C. Drage, "Removal of carbon dioxide from natural gas by vacuum pressure swing adsorption", Fuel Vol.84, pp.2204-2210, 2005
90. **** ISPE, "Caiet de sarcini – închiderea gropilor de gunoi non-conforme din județul Cluj", 2014
91. G. Staudinger, "Municipal waste thermal treatment and recovery efficiency, based on the experience and examples of the municipal waste collection and treatment from operating facilities in Austria, 3rd International Congress, Mechanical Engineers Days, Sibenik, 2013
92. ****Federal Environment Agency – Austria, "State of the art waste incinerators plants", Vienna, Austria, ISBN 3-902 338-13-X, 2002

93. ****Consiliul Local Timișoara, Propunerea tehnică acceptată, "Valorificarea energetică a combustibilului alternativ obținut din deșeuri municipale, prin realizarea unei instalații și încadrarea acestuia în cadrul CET Sud Timișoara", Volumul II, 2013
94. A.Grinza, A.Roudnev, K.E. Burgess, „ Weir slurry pumping manual-first edition, Warman International L.T.D, 2002
95. K. Blumenthal, „Generation and treatment of municipal waste”, Eurostat Statistics, Environment and Energy, 2011
96. J. Manders, „Integrated waste management of MSW across Europe Waste to Energy as a professional route to treat residual waste”, Confederation of European Waste-to-Energy, 2013
97. H. Wilts, N. Gries, "Municipal Solid Waste Management Capacities in Europe", Wuppertal Institute, 2014
98. G. Xu, M. Liu, G. Li, "Stabilization of heavy metals in lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment", Elsevier, Journal of Hazardous Materials, pp.74-81, 2013
99. X. Li, Q. Chen, Y. Zhou, " Stabilization of heavy metals in MSWI fly ash using silica fume", Elsevier, Waste Management Journal, pp.2494-2504, 2014
100. M.M. Rahman, M.T. Bassuoni, „Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation”, Elsevier, Construction and Building Materials, pp.652-662, 2014
101. D. Dermatas, X. Meng, "Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils", Engineering Geology, pp.377-394, 2003
102. ****Martin GmbH, "Martin Synthetic Combustion-Plus – Combustion Systems" ,<http://www.martingmbh.de/en/combustion-system.html>
103. M. Benjamin, "Metal treatment at superfund sites by adsorptive filtration", Emerging Technology Bulletin. EPA/540/F-92/ 008. U.S. EPA, 1992
104. ****TBA Arnoldstein, "Berechnung am der Ermittlung R1-Kriterium nach AWG 2002", Anhang 2, 2014
105. D.O. Reimann, „R1 as Efficiency Indicator Status Quo and Optimization Potential, Second International Conference, Oslo, 2010

Anexa 1

INCINERATOR: KRV Arnoldstein - eficienta energetica a incineratorului "R1"			2009	2010	2011	2012	2013	2014
1.1a	Cantitate desuri incinerata	(Mg)	73152	89123	89766	90940	90743	93869
1.1b	Putere calorifica neta (NCV)	(kJ/kg)	9852	10153	10148	9856	9953	10122
1.1c	Toleranta NCV +/-	(kJ/kg)	383	370	340	360	360	370
Ew	Energia introdusa in sistem (fara 1.1c)	(MWh)	200193	251352	253041	248974	250880	263929
2.0	Debit comb.aux. pentru functionare si Start/Stop	(Mg)	194	127	180	90	88	81
2.1a	Debit ulei pentru functionare (50% din 2.0)	(Mg)	97	64	90	45	44	41
2.1b	Putere calorifica combustibil auxiliar (ulei)	(kJ/kg)	43142	43142	43142	43142	43142	43142
Ef	Energia introdusa in sistem pentru producere abur	(MWh)	1162	761	1079	539	527	485
3.1a	Debit ulei pentru functionare (50% din 2.0)	(Mg)	97	64	90	45	44	41
3.1b	Putere calorifica combustibil auxiliar (ulei)	(kJ/kg)	43142	43142	43142	43142	43142	43142
3.1c	Energia termica introdusa cu combustibil auxiliar	(MWh)	1162	761	1079	539	527	485
3.2	Energie electrica introdusa in sistem	(MWh)	900	870	554	489	323	400
Ei	Energia introdusa in sistem fara producere abur	(MWh)	3502	3023	2519	1811	1367	1525
4.1	Energia electrica consumata in sistem	(MWh)	11895	14829	14338	14079	14319	15700
4.2	Energia electrica vanduta (livrata in retea)	(MWh)	30321	37883	39920	40442	41853	43500
Ep el prod	Energie electrica produsa in sistem	(MWh)	42216	52712	54258	54521	56172	59200
5.1	Abur tehnologic vandut (cu recuperare condensat)	(MWh)	3080	3913	2462	1469	1060	1300
5.2	Abur utilizat pentru termoficare (cu rec. condensat)	(MWh)	19074	20560	18444	21380	23917	23000
Ep heat ex	Energie termica exportata (vanduta) din sistem	(MWh)	22154	24473	20906	22849	24977	24300
6.0	Total ore functionare	(h)	6357	7805	7843	8045	8057	8120
6.1a	Consum intern abur (0,25 kg/s)	(t)	5721	7025	7059	7241	7251	7308
6.1b	Caldura specifica abur consum intern (18 bar)	(kJ/kg)	1912	1912	1912	1912	1912	1912
Ep heat int	Energie termica produsa si consumata intern	(MWh)	3039	3731	3749	3846	3852	3882
Ep	= 2,6 * Ep el prod + 1,1 * (Ep heat ex + Ep heat int)	(MWh)	137474	168076	168192	171119	177759	184920
R1	= (Ep - (Ef + Ei)) / (0,97 * (Ew + Ef))		0.6800	0.6718	0.6677	0.6973	0.7212	0.7131