

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" din BUCUREȘTI ȘCOALA DOCTORALĂ ENERGETICA

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Studiul proceselor termice de conversie optimă a biomasei prin maximizarea eficienței energetice globale

Study of optimal thermal conversion processes of biomass by maximizing global energy efficiency

Autor: Ing. Dipl. Raluca – Nicoleta TÎRTEA Conducător de doctorat: Prof. Dr. Ing. Adrian BADEA

> BUCUREŞTI 2019

CUPRINS

| CUPRINS | 3 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Listă figuri | 6 |
| Listă tabele | 11 |
| INTRODUCERE | 14 |
| CAPITOLUL I | 16 |
| 1. CONTEXT SI MOTIVATIE | 16 |
| CAPITOLUL II | |
| 2. STADIUL ACTUAL AL SOLUȚIILOR DE CONVERSIE ÎN ENERGIE A E PRIN PROCESE TERMO-CHIMICE DE COMBUSTIE ȘI GAZEIFICARE | SIOMASEI |
| 2.1. POTENȚIALUL ENERGETIC AL BIOMASEI | 23 |
| 2.1.1. Potențialul resurselor forestiere | 26 |
| 2.1.2. Potențialul reziduurilor agricole | 26 |
| 2.1.3. Potențialul culturilor energetice | 29 |
| 2.2. PROCESE TERMOCHIMICE DE CONVERSIE PENTRU BIOMASA | |
| 2.3. VARIABILE CARE AFECTEAZA PROCESELE DE CONVERSIE A B | IOMASEI 26 |
| 231 Compoziția primară | |
| 2.3.2. Compoziția elementară | 38 |
| 2.3.3. Puterea calorifică | |
| 2.3.4. Proprietătile fizice | |
| 2.3.5. Tipul instalației de conversie | 40 |
| 2.3.6. Parametrii proceselor de conversie | 40 |
| 2.3.7. Tipul oxidantului | 41 |
| 2.4. TEHNOLOGII DE CONVERSIE ÎN ENERGIE A BIOMASEI | 45 |
| 2.4.1. Tehnologii de combustie a biomasei | 45 |
| 2.4.1.1. Instalații de ardere în pat fix | |
| 2.4.1.2. Arderea în pat fluidizat | |
| 2.4.1.5. Arderea combustibiluiti in stare puiverizata | |
| 2.4.2. Tempologii de gazenicare a biomaser | |
| 2.4.2.1. Reactoare de gazeificare cu pat fluidizat | |
| 2.4.2.3. Reactoare de gazeificare cu pat antrenant | |
| CAPITOLUL III | 67 |
| 3. VALORIFICAREA BIOMASEI PRIN GAZEIFICARE ÎN TERMODINAMICE DE TIP ITG | CICLURI 67 |
| 3.1. STUDIU EXPERIMENTAL | 67 |
| 3.1.1. Proces de gazeificare – regimuri tranzitorii | 67 |
| 3.1.1.1. Gazeificare cu aer a lemnului de plop | 69 |
| 3.1.1.2. Gazeificare cu aer a tulpinilor și reziduurilor de rapiță | 75 |
| 3.1.1.3. Gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță având conținut diferit de | umiditate. |
| 2114 Gazaificara quabur a tulninilar da ranită | |
| 3.1.1.4. Gazeificare cu aer a deseului de tip food court | / ہ ۵۵ |
| 3.1.1.5. Gazeificare cu aer/abur a descului de tip food court | 90 94 |
| 3 | |

| 3.1.1.7. Concluzii |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.2. EFICIENȚA PROCESULUI DE GAZEIFICARE |
| 3.2.1. Eficiența de conversie a biomasei |
| 3.2.1.1. Eficiența de conversie a biomasei în procesele de gazeificare cu aer a |
| lemnului de plop |
| 3.2.1.2. Eficiența de conversie a biomasei în procesele de gazeificare cu aer a |
| tulpinilor și reziduurilor de rapiță101 |
| 3.2.1.3. Eficiența de conversie a biomasei în procesele de gazeificare cu aer a |
| tulpinilor de rapită având conținut de umiditate diferit |
| 3.2.1.4. Eficiența de conversie a biomasei în procesele de gazeificare cu abur a |
| tulpinilor de rapită |
| 3.2.1.5. Eficienta de conversie a biomasei în procesele de gazeificare cu aer a |
| deseului de tip food court |
| 3.2.1.6. Eficienta de conversie a biomasei în procesele de gazeificare cu aer sau abur |
| a deseului de tip food court |
| 3.2.1.7. Concluzij |
| 3.2.2. Eficienta energetică a procesului de gazeificare a biomasei |
| 3.2.2.1 Eficienta energetică a procesului de gazeificare cu aer a lemnului de plop |
| 117 |
| 3222 Eficienta energetică a procesului de gazeificare cu aer a tulpinilor si |
| reziduurilor de rapită |
| 3 2 2 3 Eficienta energetică a procesului de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapită |
| având continuit de umiditate diferit |
| 3 2 2 4 Eficienta energetică a procesului de gazeificare cu abur a tulninilor de ranită |
| 123 |
| 3225 Eficienta energetică a procesului de gazeificare cu aer a deseului de tin food |
| court |
| 3 2 2 6 Eficienta energetică a procesului de gazeificare cu aer sau abur a descului de |
| tin food court |
| $3227 \qquad \text{Concluzii} \qquad 126$ |
| 3.3 ARDEREA COMBUSTIBILILOR PRODUSI PRIN GAZEIEICARE |
| 3.4 CONVERSIA COMBUSTIBILILOR GAZOSI ÎN INSTALATIL DE TURRINE CU |
| CAZE |
| 3.5 SOLUTIA DE CONVERSIE ÎN ENERCE DRIN GAZEIEICAREA RIOMASEI ÎN |
| 5.5. SOLOȚIA DE CONVERSIE IN ENERGE I RIN GAZEII ICAREA DIOMASEI IN INSTALATILE DE MICĂ DUTEDE 140 |
| INSTALAȚIILE DE MICA FUTERE |
| CAFIIOLUL IV |
| 4. VALORIFICAREA BIOMASEI PRIN ARDERE IN CICLURI TERMODINAMICE DE |
| TIP ITA |
| 4.1. ARDEREA BIOMASEI |
| 4.1.1. Calculul procesului de ardere |
| 4.1.2. Arderea lemnului de plop |
| 4.2. CALCULUL CIRCUITULUI TERMOMECANIC 147 |
| 4.3 INFLUENTA CALITÀTII COMBUSTIBILULUI ASUPRA SISTEMULUI DE |
| CONVERSIE ÎN ENERGIE |
| 4.4. SOLUTIA DE CONVERSIE ÎN INSTALATIILE DE MICĂ PUTERE 158 |
| CAPITOLUL V 150 |
| |
| 5. STUDIU COMPARATIV PRIVIND ANALIZA EMISILOR POLUANTE A |
| DIVERSELOR SOLUȚII DE VALORIFICARE A BIOMASEI |

| 5.1. IDENTIFICAREA ȘI DETERMINAREA TIPURILOR DE POLUANȚI | 159 |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.1. Tehnologii de curățare a gazului de sinteză | 159 |
| 5.1.2. Tehnologii de curățare a gazelor de ardere | |
| 5.2. CONCENTRAȚII DE POLUANȚI ÎN FLUXURILE DE PROCES | |
| 5.3. FACTORII DE EMISIE | |
| 5.3.1. Factori de emisie raportați la energia primară | 166 |
| 5.3.2. Factori de emisie raportați la energia utilă | 168 |
| 5.4. SOLUȚIA OPTIMĂ DE CONVERSIE ÎN ENERGIE A BIOMASEI | 169 |
| CAPITOLUL VI | 171 |
| 6. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE DE CERCETARE | 171 |
| 6.1. CONCLUZII GENERALE | 171 |
| 6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE | 173 |
| 6.3. PERSPECTIVE DE CERCETARE | 174 |
| ANEXE | 175 |
| A. CALCULUL CIRCUITULUI TERMOMECANIC | |
| BIBLIOGRAFIE | |
| | |

Cuvinte cheie: biomasă, gazeificare, gaz combustibil, turbină cu gaze, combustie, turbină cu abur, producere de energie electrică, emisii poluante, energie verde.

CAPITOLUL I 1. CONTEXT ȘI MOTIVAȚIE

În sectorul energetic au fost înregistrate modificări majore în ultimii 30 de ani, în România, atât în ceea ce privește producția, consumul total și consumul per capita de energie electrică, precum și în ceea ce privește prețul energiei electrice și structura de producție din punct de vedere al surselor de energie primară utilizate [1, 2, 3]. Dacă în 1989 combustibilii fosili asigurau 90% din producția de energie electrică [5], în 2017 doar 42% din energia produsă în România a utilizat ca sursă primară de energie combustibilii fosili [6]. Acest lucru a dus la scăderea emisiilor de dioxid de carbon cu aproape două treimi [3, 7]. Însă, în condițiile actuale emisiile de gaze cu efect de seră trebuie reduse drastic pentru a minimiza poluarea și a menține o atmosferă propice pentru viață pe Terra [8]. Acest lucru poate fi realizat prin producerea energiei electrice utilizând ca surse primare de energie, sursele nepoluante, regenerabile.

Biomasa este singura sursă de energie regenerabilă, care are proprietăți similare cu cele ale combustibililor fosili: concentrare ridicată, posibilitate de stocare, poate fi transportată la distanțe mari și convertită în alte tipuri de energie – termică, mecanică, electrică; de asemenea poate fi folosită la obținerea biocombustibililor [14, 27]. De asemenea, bioenergia este singura sursă regenerabilă de energie care poate fi co-procesată cu combustibilii fosili în sistemele existente de conversie a energiei (rafinării de petrol, instalații de gazeificare a cărbunelui), în vederea asigurării unei tranziții treptate a producției de energie către o sursă regenerabilă [16].

CAPITOLUL II 2. STADIUL ACTUAL AL SOLUȚIILOR DE CONVERSIE ÎN ENERGIE A BIOMASEI PRIN PROCESE TERMO-CHIMICE DE COMBUSTIE ȘI GAZEIFICARE

2.1. POTENȚIALUL ENERGETIC AL BIOMASEI

În anul 2001, Parlamentul European și Consiliul Uniunii Europene au definit termenul "biomasă" în Directiva 2001/77/CE astfel: "biomasa reprezintă fracțiunea biodegradabilă a produselor, deșeurilor și reziduurilor din agricultură (inclusiv substanțe vegetale și animale), silvicultură și industriile conexe, precum și fracțiunea biodegradabilă a deșeurilor industriale și municipale" [24].

Astfel, sursele de biomasă sunt multiple și diversificate, acoperind o gamă largă de produși, sub-produși și deșeuri din industria forestieră, din agricultură, inclusiv cele provenite din creșterea animalelor, deșeuri municipale și industriale, precum și culturile energetice [16, 23, 26, 27]. Avantajul culturilor destinate energeticii constă în faptul că acestea nu necesită cele mai bune terenuri și nici prea multă îngrijire, apă și fertilizatori. Acest lucru se datorează faptului că importantă este cantitatea și nu calitatea culturilor.

Cel mai important potențial de biomasă din România îl au reziduurile vegetale din agricultură (63% din total), urmate de reziduurile provenite din exploatarea forestieră reprezentând 16% din total [31]. Sursele de biomasă din România sunt prezentate în Figura 2.1.



Figura 2.1. Potențialul surselor de biomasă din România [31]

2.1.1. Potențialul resurselor forestiere

În România suprafața totală a pădurilor este de 6,9 milioane hectare dintre care mai puțin de jumătate, aproximativ 3,1 milioane hectare, se află în proprietatea statului, fiind administrate de Regia Națională a Pădurilor – Romsilva [33, 34]. Volumul de masă lemnoasă care poate fi recoltat din păduri este reglementat de amenajamentele silvice, acesta fiind cam de 9 milioane m³/an [33]. În cazul în care pădurile care nu sunt în proprietatea statului sunt luate în considerare, potențialul de exploatare a pădurilor din România ar putea ajunge la o cotă anuală de 16-17 milioane metri cubi de masă lemnoasă [35]. În aceste condiții potențialul energetic anual al masei lemnoase poate fi de 115.200 TJ [36-38].

2.1.2. Potențialul reziduurilor agricole

Toate reziduurile vegetale din culturi și reziduurile lemnoase provenite de la curățarea viilor, livezilor si pajiștilor pot fi folosite pentru a produce energie verde. Cantitatea medie de boabe, reziduuri tip paie (care pot fi utilizate pentru producerea de energie), precum și raporturile pentru mai multe culturi, împreună cu puterea calorifică, suprafața cultivată în România și potențialul energetic al reziduurilor sunt prezentate în Tabel 2.1.

| | | Grâu | Alte păioase | Porumb | Floarea soarelui | Rapiță | Soia |
|--------------------------------|-------------|---------|-----------------|----------|---------------------|--------|--------|
| Cantitatea medie de cereale | t/ha | 6,5 | | 6,8 | 2,5 | 3,5 | 3,5 |
| Cantitatea medie de paie | t/ha | 5,2 | 4 | 8,9 | 10,2 | 10,1 | 2,3 |
| Proporția cereale- paie | - | 1:0,8 | | 1:1,3 | 1:1,4 | 1:2,9 | 1:0,6 |
| Puterea calorifică | kJ/kg | 17.208 | 14.000 | ~ 17.620 | 15.804 | 17.100 | 13.680 |
| Suprafața cultivată | Mii ha | ~ 2.109 | ~ 775 | ~ 2.497 | 1.011,5 | 367,9 | 128,1 |
| Cantitate anuală reziduuri | Mil tone | 10,97 | 3,1 | 22,22 | 10,32 | 3,72 | 0,29 |
| Potențial energetic | TJ | 188.717 | 43.400 | 391.575 | 163.055 | 63.540 | 4.030 |

Tabel 2.1: Producția medie de boabe și reziduuri pentru principalele culturi agricole din România [4,

30, 39, 40]

Unele dintre culturile agricole pot fi utilizate pentru producerea de energie sau a combustibililor derivați, porumbul și sfecla de zahăr pot fi utilizate pentru producerea etanolului [41-44], uleiul de rapiță poate fi utilizat la producerea bio-dieselului [45, 46], însă uleiul este destinat alimentației, astfel este prioritar unei alte industrii. Același lucru este valabil și în cazul unora dintre reziduurile agricole, acestea fiind destinate pentru hrana și adăpostul animalelor, precum și pentru menținerea fertilității solului [47] deci, nu pot fi dedicate în

totalitate sectorului energetic. Astfel, doar o parte din potențialul energetic al acestora poate fi valorificat în instalații de producere a energiei electrice sau a combustibililor derivați.

2.1.3. Potențialul culturilor energetice

Culturile energetice sunt definite în agronomie ca fiind acele culturi care sunt cultivate aproape exclusiv pentru producția de energie, inclusiv: semințe de rapiță industriale, stuf, iarbă energetică și specii diferite de lemn, cum ar fi salcâm, plop și salcie [48]. Din aceiași categorie fac parte și acele plante a căror cultivare și întreținere se face la costuri mici și nu au nevoie de anumite condiții climatice, acestea putând fi utilizate pentru producția de biocombustibili sau pot fi exploatate direct datorită conținutului energetic (producția de energie electrică și termică) [49]. Rapița, salcia energetică și plopul sunt cele mai importante culturi energetice din România. Paulownia, Mischantus și Switchgrass fac parte de asemenea din categoria culturilor energetice, însă acestea sunt cultivate cu precădere în zone cu climă diferită de cea a României.

2.2. PROCESE TERMOCHIMICE DE CONVERSIE PENTRU BIOMASĂ

Biomasa poate fi transformată în diferite forme de energie, energie electrică și/sau termică, precum și în combustibili derivați [14]. În funcție de tratamentul sau tipul de conversie căreia este supusă biomasă rezultă diferiți produși ce pot fi apoi utilizați în diferite cicluri termodinamice pentru obținerea de energie sau pot fi supuși tratamentelor chimice în vederea obținerii de combustibili pentru transport sau compuși chimici cu valoare adăugată. Biomasa poate fi transformată în diferite forme de energie prin procese de conversie termo-chimică, bio-chimică sau fizico-chimică [14, 16, 66, 67]. Procesul de conversie este ales în funcție de tipul biomasei și de debitul disponibil, precum și de efectul util dorit.

Combustia și gazeificarea sunt două procese termo-chimice asemănătoare din foarte multe puncte de vedere. Cu toate acestea, cea mai notabilă diferență dintre acestea două fiind faptul că în cazul procesului de gazeificare energia este înglobată în legături chimice în gazul produs, iar în cazul combustiei aceste legături chimice sunt rupte pentru a elibera energia [19].

Atât procesul de gazeificare, cât și procesul de combustie pot fi împărțite în mai multe etape ale procesului, însă aceste etape nu sunt clar delimitate în timp și în spațiu în interiorul reactorului, aceste etape suprapunându-se în funcție de tipul instalației [9, 19, 23, 66, 67, 69, 70]. Etapele proceselor de combustie și de gazeificare sunt:

Combustie

•

•

•

Uscare:

Piroliză;

• Aprindere;

- Gazeificare
 - Uscare;
 - Piroliză;
 - Combustia unor gaze vapori și cocs;

• Arderea cocsului.

Arderea substantelor volatile;

• Gazeificarea cocsului.

2.3. VARIABILE CARE AFECTEAZĂ PROCESELE DE CONVERSIE A BIOMASEI

Compoziția biomasei, precum și unele proprietăți fizice și termodinamice ale acesteia influențează procesele de conversie [68, 70]. Totodată, caracteristicile fizico-chimice și termodinamice ale biomasei variază pe scară largă, aceste variații putând apărea chiar și între două probe aparținând aceleiași surse în funcție de locul de proveniență al acesteia, în special în cazul deșeurilor. Din această cauză, cunoașterea valorii unei singure proprietăți a biomasei nu este suficientă pentru caracterizarea unui proces sau pentru dimensionarea unei instalații de conversie termochimică [68].

Dintre proprietățile fizico-chimice și termodinamice care afectează procesele de conversie termică cele mai importante sunt: permeabilitatea, densitatea, suprafața specifică, porozitatea, reactivitatea, conductivitatea termică, căldura specifică, căldura de formare, căldura de reacție, puterea calorifică, temperatura de aprindere, la care se adaugă parametrii de proces: temperatură, presiune, stoichiometrie [19, 68, 70, 71]. Compoziția combustibilului este importantă în ceea ce privește emisiile și gazele cu efect de seră, în principal emisiile cauzate de arderea completă și problemele cauzate de cenușă [70].

| Variabila | Efect/influență | | | |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| | - scade temperatura procesului | | | |
| | creșterea timpului de rezidență | | | |
| | - apariția emisiilor din arderea incompletă | | | |
| Ilmiditataa | - stabilitatea flăcării | | | |
| | - scăderea eficienței sistemului | | | |
| combustionului | - perioada de depozitare | | | |
| | - puterea calorifică inferioară | | | |
| | alegerea instalației de conversie | | | |
| | - pierderile de energie cu uscarea | | | |
| | - reactivitatea combustibilului. Biomasa este mai reactivă | | | |
| Continutul de substante | (poate fi mai ușor convertită în gaz) decât cărbunele, datorită | | | |
| | conținutului mai mare de substanțe volatile | | | |
| volatile | - descompunerea termică | | | |
| | - comportamentul arderii | | | |
| Conținutul de carbon fix | influențează mărimea reactorului și durata procesului | | | |
| | - temperatura procesului | | | |
| | - emisii de praf | | | |
| | - manipularea cenușii | | | |
| | - utilizarea/eliminarea cenușii | | | |
| | - tipul instalației de conversie | | | |
| | - siguranța în operare | | | |
| | - formarea depunerilor | | | |
| | - sistemul de control al procesului | | | |
| Continutul de cenusă și | - alcali și fosfor - zgură și ancrasare, utilizarea cenușii, | | | |
| compoziția acesteia | formarea depozitelor | | | |
| compoziția acesteia | - potasiu (și siliciu) - punct scăzut de topire al cenușii, | | | |
| | ancrasare, coroziune, formare de aerosoli, utilizarea cenușii | | | |
| | - fluor – emisii de HF, coroziune | | | |
| | - sodiu - topirea cenușii, coroziune, formare de aerosoli, | | | |
| | utilizarea cenușii | | | |
| | - magneziu, calciu – crește punctul de topire al cenușii, | | | |
| | utilizarea acesteia, formarea depozitelor | | | |
| | - oligoelemente, metale grele – emisii, utilizarea cenușii, | | | |
| | formarea aerosolilor | | | |
| | - Carbon – puterea calorifică, posibile emisii de CO în cazul | | | |
| | arderii incomplete | | | |
| Compoziția elementală | Hidrogen – puterea calorifică | | | |
| | Oxigen – puterea calorifică (impact negativ) | | | |
| | - Azot – emisii de NO, NO2, N2O și NH ₃ | | | |

Tabel 2.2: Variabile care influențează procesele de conversie [9, 16, 17, 19, 67, 68, 70, 71, 173]

| | Sulf – emisii de SO_x, coroziune, emisii suplimentare de CO₂, impact asupra instalațiilor de curățare a gazelor din aval și a operațiilor de sinteză a combustibilului Clor – coroziune și poluare – emisii de HCl și dibenzo-p- dioxină / furan policlorurat (PCDD/F), otrăvirea |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | catalizatorilor, scade punctul de topire al cenușii |
| Puterea calorifică | utilizarea combustibiluluitipul instalației |
| Densitatea | manipularea materiei prime vitezele și eficiențele procesului de conversie volumul camerei de ardere în funcție de energia de intrare caracteristicile de ardere conductanța termică segregare descompunerea termică |
| Densitatea vrac | - logistică – depozitare, transport, manevrare |
| Dimensiunea | manipularea materiei prime vitezele și eficiențele procesului de conversie timpul de rezidență proprietățile aerodinamice suprafața activă |
| Porozitatea | formarea particulelor fine la procesare reactivitatea (pierderea masei în unitatea de timp) comportamentul la devolatilizare transferul de căldură și masă conversia |
| Omogenitatea | - controlul procesului |
| Aria suprafeței de contact | - reactivitatea |
| Conductivitatea electrică | prelucrarea cu microunde, curățarea particulelor prin precipitare electrostatică evacuarea particulelor fine din centrală |
| Higroscopicitate | - logistică – depozitare, transport, manevrare |
| Forma și dimensiunea particulei (distribuția) | spațiul de depozitare (dimensiune/forma unei grămezi, autoaprinderea) caracteristicile de transport (transportul) comportamentul de transfer de căldură și masă tipul instalației de conversie siguranța operațională uscarea formarea prafului |
| Conductivitatea termică | - procesare fizico-chimică (transfer de căldură) |
| Cota de particule fine (rezultate la presarea lemnului) | volumul depozitului pierderile la transport formarea prafului |
| Rezistența la abraziune a lemnului | schimbarea calității separare particule fine |

| Schimbătoarele de căldură | - schimbul de căldură cu împrejurimile sau cu apa de încălzire | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| Staționarea și distribuția aerului (ardere) | emisii cauzate de ardere incompletă emisii de NO_x temperatura procesului | | |
| Distribuția combustibilului | - reactivitatea | | |
| Mecanism de transfer de căldură | emisii cauzate de arderea incompletă eficiența termică | | |
| Izolația | emisii cauzate de arderea incompletă temperatura procesului | | |
| Preîncălzirea aerului | - temperatura | | |
| Stoichiometria procesului și tipul agentului oxidant utilizat (gazeificare) | temperatura procesului volumul de gaze de ardere (ardere) compoziția și puterea calorifică a gazului produs (gazeificare) eficiența de conversie investiția specifică | | |
| | raport oxigen-abur scăzut – cresc concentrațiile de H₂ și CH₄ raport oxigen-abur mare – cresc concentrațiile de CO și CO₂ | | |
| Presiunea | presiunea înaltă – reducerea energiei de comprimare și a mărimii instalației (gazeificare); favorizează producția de amoniac; scade reactivitatea cocsului compoziția și puterea calorifică a gazului concentrațiile de CO₂ și de CH₄ cresc cu creșterea presiunii concentrațiile de CO și H₂ scad la creșterea presiunii eficiența de conversie | | |
| Temperatura | temperatură ridicată – crește consumul de oxigen și se eficiența globală a procesului (gazeificare), apa emisiilor de NO_x concentrațiile de CO₂ și CH₄ scad la creșterea temperatur concentrațiile de CO și H₂ cresc la creșterea temperatur | | |

2.4. TEHNOLOGII DE CONVERSIE ÎN ENERGIE A BIOMASEI

Atât instalațiile de ardere a biomasei, cât și reactoarele de gazeificare a biomasei, au la bază tehnologiile de conversie a combustibililor fosili, cu adaptările impuse de caracteristicile biomasei.

2.4.1. Tehnologii de combustie a biomasei

Instalațiile de ardere a biomasei, denumite și cazane, furnale sau cuptoare, sunt clasificate în funcție de condițiile de curgere din interiorul instalației, astfel [16, 177]:

- instalații de ardere cu pat fix/cu grătar;
- instalații de ardere cu pat fluidizat;
- instalații de ardere cu pat antrenant.

Pentru alegerea unei instalații de ardere trebuie să se țină cont de proprietățile combustibilului și de necesarul de abur a fi produs. De asemenea, un singur tip de instalație de ardere nu poate fi dezvoltată la orice scară, există un interval de putere caracteristic fiecărui tip de instalație. Instalațiile de ardere cu pat fix sunt de regulă utilizate pentru centrale de putere

mai mici (2,5-175 MW_t); instalațiile de ardere cu pat fluidizat sunt specifice instalațiilor de medie putere ($<750 \text{ MW}_t$); reactoarele de ardere cu pat antrenant sunt utilizate în instalații de mare putere ($<2500 \text{ MW}_t$) [16, 69]. În Figura 2.2 sunt prezentate nivelurile de putere în care se încadrează diferitele tipuri de instalații de ardere.



Figura 2.2. Instalații de ardere și nivelurile de putere în care se încadrează [16, 69, 70]

2.4.2. Tehnologii de gazeificare a biomasei

Reactorul de gazeificare sau gazeificatorul reprezintă instalația în care are loc procesul de gazeificare. În momentul de față există sute de variante constructive ale acestei instalații, acestea fiind împărțite în mai multe categorii în funcție de sursa de căldură, agentul oxidant utilizat, transportul combustibilului în reactor, presiune și contactul între faza solidă și cea gazoasă. Astfel, sunt întâlnite următoarele tipuri de reactoare în funcție de transportul combustibilului în reactor [16, 17, 19, 23, 66, 67, 178-180]:

- reactoare de gazeificare cu pat fix;
- reactoare de gazeificare cu pat fluidizat;
- reactoare de gazeificare cu pat antrenant.

Un singur tip de gazeificator nu poate fi dezvoltat la orice scară, există un interval de putere caracteristic fiecărui tip de reactor de gazeificare. Reactoarele de gazeificare cu pat fix sunt de regulă utilizate la scară mică de putere ($< 10 \text{ MW}_t$); reactoarele de gazeificare cu pat fluidizat sunt specifice instalațiilor de medie putere ($5 - 100 \text{ MW}_t$); reactoarele de gazeificare cu pat antrenant sunt utilizate în instalații de mare putere ($>50 \text{ MW}_t$) [16, 19, 69]. În Figura 2.3 sunt prezentate intervalele de putere corespunzătoare fiecărui tip de reactor.



Figura 2.3: Instalații de gazeificare și nivelurile de putere în care se încadrează [16, 19, 69]

În Tabel 2.3 este prezentată o comparație a celor trei categorii de reactoare de gazeificare – cu pat fix, cu pat fluidizat, cu pat antrenat – în funcție de parametrii și caracteristicile acestora.

| | Tip reactor | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Parametru / caracteristica | Pat fix/mobil | Pat fluidizat | Pat antrenant | |
| Dimensiune combustibil | < 51 mm | < 6 mm | < 0,15 mm | |
| Toleranța la particule fine | Limitat | Bun | Excelent | |
| Toleranța la abraziune | Foarte bună | Bună | Slabă | |
| Temperatură ieșire gaz | 425 – 650 °C | 800 − 1050 °C | 1250 – 1600 °C | |
| Combustibil acceptat | Cărbune rang inferior, biomasă. Combustibil cu conținut de umiditate mai mic de 20 % pentru reactoarele de tip downdraft. | Cărbune rang inferior și excelent pentru biomasă | Orice cărbune, inclusiv cel cu tendință de aglutinare, dar necorespunzător pentru biomasă | |
| Cerințe oxidant | Scăzut | Moderat | ridicat | |
| Temperatura în zona de reacție | 1090 °C | 800 – 1000 °C | > 1990 °C | |
| Cerințe abur | Ridicat | Moderat | scăzut | |
| Cenușa produsă | Uscată. În funcție de tipul combustibilului, uneori se poate forma zgură în reactoarele de updraft. | Uscată. | Zgură | |
| CGE | Relativ mare, însă, dacă nu se ține cont de producția de gudron ca și produs util, atunci eficiența scade. De regulă cold-gas efficiency este de 70 % pentru reactoare atmosferice ce utilizează aer ca agent oxidant, însă poate atinge si valori de 80 % | Moderată pentru instalații atmosferice ce utilizează aer ca oxidant. Valorile eficienței sunt între 60 % pentru reactoare atmosferice utilizând aer și 70 % pentru reactoare presurizate ce utilizează oxigen, însă pot fi obținute și valori ale eficienței de 89,2 % | 80 % | |
| HGE | Ridicată (aproximativ 80 %) | Moderată (60 %) până la ridicată (85 %). Valorile maxime se obțin în reactoarele presurizate. | | |
| Aplicații | Puteri mici (10 kW – 10 MW) | Puteri medii (5 – 500 MW) | Puteri mari (50 – peste 1000 MW | |
| Zone cu probleme | Producția de gudron și particule fine | Conversia carbonului | Răcirea gazului | |

Tabel 2.3: Analiză comparativă a tipurilor de reactoare de gazeificare [17, 19, 67, 68, 71, 173, 175]

| Puncte tari și puncte slabe | Downdraft: putere calorifică scăzută, pulberi moderat, gudron puțin Updraft: putere calorifică ridicată, pulberi moderat, gudron mult Crossdraft: putere calorifică scăzută, pulberi moderat, gudron mult | Capacitate mai mare decât reactoarele cu pat fix, transfer de căldură și masă de la combustibil îmbunătățit, putere calorifică mai mare, eficiență mai mare | Poate gazeifica toate tipurile de cărbuni, căldură sensibilă mare în gaz, capacități mari, implică zgurificarea cenușii. |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sensibilitate la: | | | |
| Specificațiile combustibilului | Downdraft: specificUpdraft: moderatCross-draft: moderat | Cu barbotare: flexibilCirculant: flexibil | |
| Dimensiunea combustibilului | Downdraft: bună Updraft: foarte bună Cross-draft: bună | Cu barbotare: acceptabilCirculant: acceptabil | |
| Conținut umiditate | Downdraft: f acceptabil Updraft: foarte bună Cross-draft: bună | Cu barbotare: bunăCirculant: bună | |
| Conținut de cenușă | Downdraft: scăzut Updraft: scăzut Cross-draft: scăzut | Cu barbotare: foarte bunCirculant: foarte bun | |
| Temperatura de reacție | Downdraft: 1000 °C Updraft: 1000 °C Cross-draft: 900 °C | Cu barbotare: 850 °C Circulant: 850 °C | |
| Amestecarea combustibilului | Downdraft: scăzut Updraft: scăzut Cross-draft: scăzut | Cu barbotare: foarte bunCirculant: excelent | |
| Temperatură ieșire gaz | Downdraft: 800 °C Updraft: 250 °C Cross-draft: 900 °C | Cu barbotare: 800 °C Circulant: 850 °C | |
| Conținut de gudron în gaz | Downdraft: foarte scăzut (~ 1 000 mg/Nm³) Updraft: foarte ridicat (~ 50 000 mg/Nm³) | Cu barbotare: moderat (1- 15 g/Nm³) Circulant: scăzut (~ 10 000 mg/Nm³) | Datorită temperaturilor înalte aproape tot gudronul este distrus, rezultând un gaz cu concentrații |

| | - Cross-draft: foarte ridicat | | scăzute de CH ₄ sau alte |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | hidrocarburi ușoare. |
| Conținut de praf în gaz | Downdraft: moderat (0,1- 0,2 g/Nm³) Updraft: bun (0,1-1 g/Nm³) Cross-draft: ridicat | Cu barbotare: foarte ridicat (2-20 g/Nm³) Circulant: foarte ridicat (10-35 g/Nm³) | |
| Conținut de cocs în gaz | - Downdraft: 9,3-30 g/Nm ³ | Cu barbotare: 1,04-43,61 g/Nm³ Circulant: 1,7-13,1 g/Nm³ | |
| Turndown ratio | Downdraft: acceptabil Updraft: bun Cross-draft: bun Moderată, aproximativ 2/1 | Cu barbotare: foarte bun Circulant: bun Ridicată, aproximativ 4/1. Pot fi obținute și valori mai mari pentru instalații mari unde patul poate fi împărțit în secțiuni. | |
| Potențial de scalare | Downdraft: scăzut Updraft: bun Cross-draft: scăzut | Cu barbotare: bunCirculant: foarte bun | |
| Pornire | Downdraft: scăzut Updraft: scăzut Cross-draft: scăzut | Cu barbotare: bunCirculant: bun | |
| Control | Downdraft: acceptabil; dificultăți în menținerea unui profil de temperatură uniform Updraft: acceptabil; timp de răspuns ridicat Cross-draft: acceptabil | Cu barbotare: foarte bun Circulant: foarte bun Timp de răspuns scurt, câteva minute, pentru o gamă largă de dimensiuni ale instalației. | |
| Conversia carbonului | Downdraft: foarte bună Updraft: foarte bună Cross-draft: scăzută În reactoarele cu pat fix, eficiență ridicată de conversie a carbonului | Cu barbotare: acceptabil Circulant: foarte bună O eficiență a conversiei carbonului de pe 95 % este dificil de obținut din cauza compromisurilor dintre | Ridicată |

| | poate fi obținută cu eforturi | calitatea gazului și regimul de | |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------|
| | minime. | fluidizare. Această eficiență este și | |
| | | mai mică în cazul reactoarelor ce | |
| | | utilizează aer în loc de oxigen. | |
| | | Timpul de rezidență este mai mare | |
| | | decât în cazul reactoarelor cu pat | |
| | | fix, pentru obținerea aceleiași | |
| | | eficiențe de conversie, o soluție ar | |
| | | fi presurizarea. | |
| | - Downdraft: foarte bună | - Cu barbotare: bună | |
| Eficiența termică | - Updraft: excelentă | - Circulant: foarte bună | |
| , | - Cross-draft: bună | | |
| | - Downdraft: scăzută | - Cu barbotare: scăzută | |
| Puterea calorífica inferioara a | - Updraft: scăzută | - Circulant: acceptabil | Moderată |
| gazului | - Cross-draft: scăzută | L | |
| | O fază gazoasă si câte o fază pentru | | |
| | fiecare solid implicat. De regulă | Două faze gazoase (emulsie de gaz | |
| Numarul obișnuit de faze implicate | reactoarele de gazeificare implică | și baloane) plus o faza pentru | |
| | un singur solid, deci două faze. | fiecare solid implicat. | |
| | | Peste limita minimă de fluidizare și | |
| Viteza superficială a gazului | Relativ scazuta sau sub limita | până la limita transportului | |
| | minima de fluidizare. | pneumatic. | |
| | Cresc odată cu creșterea vitezei | Rămân constante în intervalul de | |
| Pierderile de presiune in pat | superficiale | fluidizare | |
| | Moderate, în mare parte datorate | | |
| | posibilității de întrerupere cauzate | | |
| | de blocaje din cauza temperaturilor | | |
| | mari din zona de ardere care pot | | |
| | depăsi temperatura de | Moderate spre scazute. Pot aparea | |
| Riscuri operare | topire/înmuiere a cenusii, si a | probleme in pat, din cauza | |
| L | gudronului care actionează ca | temperaturilor ridicate ce depășesc | |
| | legătură între particule în zona de | temperatura de înmuiere a cenușii. | |
| | | | |
| | devolatilizare, în mare parte pentru | | |
| | devolatilizare, în mare parte pentru particulele de dimensiuni mici sau | | |

| Nivelul emisiilor poluante | Ridicat și dificil de evitat | Scăzut și ușor de controlat. Principalul motiv este posibilitatea adăugării unui solid ce absoarbe poluanții în pat. Acesta se amestecă foarte bine cu alte solide și menține un contact bun cu faza gazoasă. Temperaturile relativ mici minimizează productia de NO _x | |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Costul capitalului | Moderate. Trebuie să se acorde o atenție deosebită dispozitivului de îndepărtare a cenușii și a materialului din apropierea zonei de ardere | Scăzute, datorită temperaturii relativ scăzute și uniforme în pat. | |

CAPITOLUL III 3. VALORIFICAREA BIOMASEI PRIN GAZEIFICARE ÎN CICLURI TERMODINAMICE DE TIP ITG

3.1. STUDIU EXPERIMENTAL

3.1.1. Proces de gazeificare – regimuri tranzitorii

Simulările experimentale ale procesului gazeificare au fost realizate în instalația reactor tubular, tip batch, aflată în dotarea Laboratorului de Surse Regenerabile de Energie al Universității Politehnica din București. Reactorul tubular special proiectat de Prof. Dr. Ing. Cosmin Mărculescu pentru aceste tipuri de experimente folosește ca platformă de încălzire un cuptor electric tubular NABERTHERM, model RO 60/750/13. Instalația experimentală permite simularea procesului de gazeificare, cu aport extern de energie, folosind ca agent de proces aerul, oxigenul sau apa. Aceasta permite realizarea procesului de gazeificare în regim discontinuu, configurația acesteia conducând la determinarea bilanțului de masă și energie, determinarea proprietăților sub-produșilor rezultați și stabilirea parametrilor optimi de proces în funcție de condițiile urmărite. Schema procesului de gazeificare în reactorul tubular, tip batch este prezentată în Figura 3.1.



Figura 3.1. Schema tipică experimentală a procesului de gazeificare

În cazul proceselor de gazeificare cu aer, acesta a fost introdus în reactor cu ajutorul unui compresor de aer, debitul de aer fiind controlat cu ajutorul unui rotametru. În cazul proceselor de gazeificare cu abur, apa a fost introdusă în proces cu ajutorul unei pompe de injecție automată cu seringă, la un debit constant și controlat. În funcție de cantitatea necesară de agent oxidant și de debitul cu care acesta a fost introdus în proces, a rezultat durata procesului de gazeificare prezentă în tabelele corespunzătoare fiecărui set de măsurători efectuat.

Pentru analiza gazului produs și pentru observarea regimului tranzitoriu al procesului de gazeificare s-a introdus sonda analizorului de gaze de tip Testo 350 XL la racordul de evacuare al sistemului de condensare a gazelor. Concentrațiile speciilor gazoase pot fi analizate în timp real în timpul procesului, astfel se poate observa regimul tranzitoriu al procesului de gazeificare.

Cu ajutorul datelor măsurate se pot ridica curbe de variație a concentrațiilor instantanee ale speciilor gazoase în timp, acestea fiind necesare analizei procesului staționar de gazeificare și pentru stabilirea parametrilor optimi de proces.

Analizând regimul tranzitoriu al unui proces de gazeificare, etapele de gazeificare pot fi delimitate în timp, cu aproximație, se poate determina compoziția gazului produs în fiecare etapă și se poate determina eficiența de conversie a materialului și eficiența procesului în funcție de parametrii studiați.

Rezultatele experimentelor de gazeificare în regim discontinuu – regim tranzitoriu – nu relevă compoziția finală a singazului, ci doar o compoziție intermediară, întrucât procesul nu este complet – ca în cazul unui proces de gazeificare în regim continuu. Cu toate acestea, abordarea propusă relevă stadiul inițial al proceselor de gazeificare și servește drept punct de plecare pentru obținerea parametrilor optimi de proces necesari pentru inițierea gazeificării diferitelor materiale studiate în condițiile propuse.

Cele trei materiale studiate au fost lemnul de plop, reziduurile de rapiță și deșeul de tip food court. Temperatura procesului a variat între 650°C și 850°C, iar rata echivalentă de aer a variat între 0,25 și 0,40. Pentru fiecare set de măsurători efectuat au fost stabiliți și calculați diferiți parametrii de proces, aceștia fiind prezentați în tabele.

3.1.1.1. Gazeificare cu aer a lemnului de plop

Plopul a fost studiat de-a lungul timpului dovedindu-și capabilitatea de a fi utilizat ca materie primă în procesele de gazeificare [183-185]. Gazul obținut în urma gazeificării lemnului prezintă bune proprietăți de ardere, acesta putând fi utilizat cu succes pentru producerea de energie electrică [186, 187]. Regimul tranzitoriu pentru plop a fost determinat pentru a servi ca termen de comparație pentru regimurile tranzitorii a altor două materiale, care încă nu au fost studiate ca potențiale materii prime în procesele de gazeificare, și pentru stabilirea parametrilor optimi de proces în funcție de condițiile urmărite.

| 1400101111 | arannear | | | Benneare | | | a prop | 108 | anertorit | - |
|-------------------|----------|-------|-------|----------|-------|--------|--------|-------|-----------|-------|
| Temperatură | °C | | 650 | | | 750 °C | | | 850 °C | |
| ER | - | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,25 | 0,30 | 0,35 |
| Cantitatea probă | gr | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Necesarul de aer | 1 | 10,49 | 12,59 | 14,68 | 10,49 | 12,59 | 14,68 | 10,49 | 12,59 | 14,68 |
| Debitul de aer | l/min | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Presiune | bar | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 |
| Durata procesului | min | 10:30 | 12:30 | 14:40 | 10:30 | 12:30 | 14:40 | 10:30 | 12:30 | 14:40 |

| TT 1 1 0 1 D | 1 1 '0' | 1 1 1 1 | • , •, • |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Tabel 3 1. Parametrii n | proceselor de gazeificare ci | u aer a lemnuluu de nic | n = regim franziforiu |
| ruber 5.1. rurumenn p | Succession de Succimente e | a act a termitatur de pro | p regim d'anzitoria |

În Figurile 3.2 - 3.4 sunt prezentate regimurile tranzitorii ale plopului la 650°C și ER 0,25, 0,30 și, respectiv, 0,35. În Figura 3.2 sunt delimitate pe grafic etapele procesului de gazeificare. Etapele procesului de gazeificare au durate diferite de la un proces la altul în funcție de temperatura procesului, de agentul de gazeificare și de materialul utilizat și, în unele cazuri, de valoarea ER.

Urmărind cele trei grafice (Figurile 3.2.-3.4.), putem observa că valoarea ER influențează durata etapelor de gazeificare. Fiind necesară o cantitate mai mare de aer pe măsură ce crește valoarea ER și din cauza faptului că sunt păstrate constante cantitatea de probă și debitul de alimentare cu aer, atunci, perioada de alimentare a aerului în reactor (durata totală a procesului) este mai lungă. În consecință va crește perioada de gazeificare a cocsului, întrucât această etapă începe la aproximativ patru minute și jumătate de la startul procesului și ține până la finalizarea acestuia, în toate cele trei cazuri.



Figura 3.2. Gazeificare cu aer a lemnului de plop – regim tranzitoriu – 650°C; ER = 0,25





Analizând cele două grafice de mai sus se pot stabili parametrii optimi de proces pentru gazeificarea cu aer a lemnului de plop, și anume: pentru maximizarea concentrațiilor de CO și H_2 în gazul produs, parametrii optimi de proces sunt temperatura procesului 750-850°C și ER 0,25-0,30.

3.1.1.2. Gazeificare cu aer a tulpinilor și reziduurilor de rapiță

Rapița este o plantă cultivată anual în România pe suprafețe destul de mari, fiind generată anual o cantitate considerabilă de reziduuri. Reziduurile de rapiță generate anual au un potențial energetic de aproximativ 63540 TJ. Până în prezent, tulpinile de rapiță nu au fost utilizate ca materie primă în procesele de gazeificare, dar au fost studiate pentru producerea bio-etanolului [189] și a bio-uleiului [114]. În ceea ce privește gazeificarea acestora au fost realizate doar simulări [190] sau studii de pre-tratare prin torefiere [191], în vederea utilizării ulterioare a acestora în procese de gazeificare.

Probele de tulpini de rapiță utilizate în cadrul experimentelor sunt reprezentate de tulpinile plantei, colectate manual înainte de recoltare, iar probele de reziduuri sunt reprezentate de resturile care rămân în urma recoltării tulpinilor de rapiță cu utilaje agricole.

| | 0 | | |
|-------------------------------------|-------|-------------------|------------------------|
| Tip material Parametru proces | U.M. | Tulpini de rapiță | Reziduuri de rapiță |
| Temperatură | °C | 650/750/850 | 650/750/850 |
| ER | - | 0,25 / 0,3 | 0,25 / 0,3 |
| Cantitatea probă | gr | 12 /10 | 12 /10 |
| Necesarul de aer | 1 | 12,51 | 11,07 |
| Debitul de aer | l/min | 1 | 1 |
| Presiune | bar | 1,013 | 1,013 |
| Durata procesului | Min | 12:30 | 11:04 |

Tabel 3.2: Parametrii proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor și reziduurilor de rapiță – regim tranzitoriu

În Figura 3.7, și respectiv Figura 3.8, sunt prezentate regimurile tranzitorii ale procesului de gazeificare cu aer a tulpinilor și a reziduurilor de rapiță la 650°C și valoarea ERului de 0,25.





Figura 3.11. Variația concentrației de monoxid de carbon – gazeificare cu aer a reziduurilor de rapiță

Figura 3.12. Variația concentrației de hidrogen - gazeificare cu aer a reziduurilor de rapiță

850°C

750°C

Temperatura procesului

ER = 0.25

-ER = 0.30

În funcție de concentrația speciei gazoase ce se dorește a fi maximizată în gazul produs, în cazul gazeificării cu aer a tulpinilor sau a reziduurilor de rapiță, putem avea două seturi de parametrii optimi de proces. Astfel avem:

- Dacă se dorește maximizarea concentrației de monoxid de carbon în gazul produs, atunci parametrii optimi de proces sunt: Temperatură 850° C și ER = 0,25;

0

650°C

- Dacă se dorește maximizarea concentrației de hidrogen în gazul produs, atunci parametrii optimi de proces sunt: Temperatură 850° C și ER = 0,30.

Analizând rezultatele obținute pentru cele două tipuri de materiale, tulpini și reziduuri de rapiță, se poate observa că acestea nu diferă foarte mult în ceea ce privește comportamentul acestora în procesele de gazeificare. Astfel, metoda de recoltare a acestora nu influențează considerabil utilizarea acestora în procesele de gazeificare.

3.1.1.3. Gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță având conținut diferit de umiditate

În acest subcapitol au fost studiate tulpinile de rapiță având conținut diferit de umiditate, comparativ cu materialul uscat. S-a urmărit influența conținutului de umiditate al probei asupra procesului de gazeificare și al producției de hidrogen. Au fost alese valorile conținutului de umiditate al probei de 5% și respectiv, 10%. Au fost alese aceste valori ale conținutului de umiditate deoarece imediat după recoltare conținutul de umiditate al tulpinilor de rapiță era de 4,93% (aproximativ 5%), iar după o perioadă de peste trei luni în care probele de rapiță au fost mărunțite și depozitate în laborator (loc cu umiditate destul de ridicată), a fost determinat încă o dată conținutul de umiditate al tulpinilor de rapiță, acesta fiind de 9,31% (aproximativ 10%).

| Parametru proces | U.M. | W = 0% | W = 5% | W = 10% |
|------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Temperatură | °C | 650 / 750 / 850 | 650 / 750 / 850 | 650 / 750 / 850 |
| Presiune | bar | 1,013 | 1,013 | 1,013 |
| Greutate probă | gr | 10 | 10 | 10 |
| ER | - | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| Cantitate aer | 1 | 12,51 | 11,89 | 11,26 |
| Debit aer | l/min | 1 | 1 | 1 |
| Durată proces | min | 12:30 | 11:55 | 11:15 |

Tabel 3.3: Parametrii proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță având conținut diferit de

În Figurile 3.13. – 3.15. sunt prezentate regimurile tranzitorii ale proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță, la ER = 0,30 și temperatura procesului de 850°C, în funcție de conținutul de umiditate al probei. În urma analizei celor trei grafice se observă că variația concentrațiilor speciilor gazoase nu este influențată de conținutul de umiditate al materialului analizat.









Analizând cele două grafice de mai sus se pot stabili parametrii optimi de proces pentru procesul de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță având conținut diferit de umiditate. Pentru maximizarea concentrațiilor speciilor gazoase (CO și H₂) la această rată echivalentă de aer, de 0,30, temperatura optimă de proces este 850°C. În urma rezultatelor obținute se poate concluziona că la acest nivel al conținutului de umiditate nu este necesară uscarea tulpinilor de rapiță pentru utilizarea acestora în procesele de gazeificare, întrucât conținutul acestora de umiditate nu influențează considerabil concentrațiile gazelor combustibile.

3.1.1.4. Gazeificare cu abur a tulpinilor de rapiță

Utilizarea aburului ca agent oxidant are ca scop creșterea concentrației de hidrogen în gazul obținut. Pentru a observa influența producției de hidrogen în gazul produs în funcție de tipul agentului de gazeificare utilizat au fost repetate experimentele de gazeificare a tulpinilor de rapiță (material uscat) la 750 și 850°C păstrând constanți toți parametrii de proces, mai puțin tipul oxidantului. S-a ținut cont de cantitatea de oxigen introdusă în proces odată cu aerul (ER = 0,30), aceiași cantitate de oxigen fiind introdusă acum în proces odată cu apa.

| Parametru proces | U.M. | Valoare |
|------------------|---------|-----------|
| Temperatură | °C | 750 / 850 |
| Presiune | bar | 1,013 |
| Greutate probă | gr | 10 |
| ER echivalent | - | 0.30 |
| Cantitate apă | ml | 4.16 |
| Debit apă | ml/min | 0.33 |
| Durată proces | min:sec | 12:30 |

Tabel 3.4: Parametrii proceselor de gazeificare cu abur a tulpinilor de rapiță - regim tranzitoriu

Comparând regimurile tranzitorii ale procesului de gazeificare cu abur a tulpinilor de rapiță la 750 (Figura 3.18) și 850°C (Figura 3.19), cu cele ale procesului de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță la aceleași temperaturi ale procesului se poate observa că în cazul monoxidului de carbon și a hidrogenului, concentrațiile instantanee ale acestora se mențin la o valoare mai ridicată și în etapa de gazeificare a cocsului. Astfel, în afară de primele minute ale

procesului, când hidrogenul începe să se formeze, concentrația de hidrogen este aproximativ constantă pe toata durata procesului.







Comparând valorile din Figura 3.20 cu cele din Figura 3.16, se poate observa că în cazul utilizării aburului ca agent oxidant în procesele de gazeificare a tulpinilor de rapiță uscate, se înregistrează o concentrație instantanee maximă de CO mai mare cu aproximativ două/trei puncte procentuale pentru aceiași valoare a temperaturii procesului, comparativ cu cazul utilizării aerului în proces. În cazul hidrogenului nu se poate determina concentrația instantanee maximă la 850°C, întrucât analizorul de gaze nu poate afișa și înregistra o concentrație de H₂ mai mare de 9,99%, însă aceasta este cu siguranță mai mare de 10%. Se observă o creștere a concentrației instantanee maximă de H₂ la creșterea temperaturii procesului de la 750°C la 850°C. Comparând datele din Figura 3.20 cu datele din Figura 3.17, se observă o creștere a concentrației maxime instantanee de hidrogen cu cinci puncte procentuale, și respectiv, minim un punct procentual, la utilizarea aburului ca agent oxidant în procesul de gazeificare la 750°C, și respectiv, 850°C.



Figura 3.20. Variația concentrației speciilor gazoase - gazeificarea cu abur a tulpinilor de rapiță

În urma experimentelor de gazeificare a tulpinilor de rapiță efectuate parametrii optimi de proces sunt: utilizarea aburului ca agent de proces și temperatura 850°C. Însă, dacă aburul nu poate fi utilizat ca agent oxidant, pentru gazeificarea cu aer a tulpinilor de rapiță parametrii optimi sunt: temperatura de 850°C și ER = 0,30.

3.1.1.5. Gazeificare cu aer a deșeului de tip food court

Deșeul de tip food court (Food Court Waste – FCW) este deșeul generat în centrele comerciale în zonele de food court (restaurante). Acesta are în compoziția sa, de regulă, următoarele componente: hârtie, carton, plastic, lemn, deșeuri organice, metal și sticlă. Hârtia, cartonul și plasticul sunt reprezentate de deșeurile de ambalaje, precum și tacâmuri și veselă de unică folosință. Deșeurile organice sunt reprezentate de resturile de mâncare. Lemnul se regăsește în cantități mici. Metalul, sau mai precis aluminiu, și sticla reprezintă de asemenea deșeuri de ambalaje, în acestea fiind îmbuteliate băuturi.

În funcție de tipul restaurantelor din zona de food court a centrelor comerciale, de anotimp, zi a săptămânii și chiar și momentul zilei, compoziția acestui deșeu poate varia în limite foarte largi. Spre exemplu, deșeul provenit din anumite centre comerciale poate să nu conțină în compoziția sa metal sau sticlă. De asemenea, deșeurile organice fiind reprezentate

de resturile alimentare, diferă foarte mult în funcție de tipul restaurantelor prezente în fiecare locație, cu specific românesc, asiatic, italienesc, fast food, etc.

Cele cinci componente principale ale deșeului – hârtie, carton, plastic, reziduuri organice și lemn – au fost studiate individual [192-200], precum și în diferite amestecuri [201-204] de-a lungul timpului, ca materie primă pentru procesele de conversie termo-chimică. Rezultatele cercetărilor au demonstrat că aceste cinci materiale, tratate individual, pot fi utilizate cu succes în procesele de gazeificare.

| 1 | 0 | 1 | <u> </u> |
|------------------|---------|-----------------|-----------------|
| Parametru proces | U.M. | ER = 0,25 | ER = 0,40 |
| Temperatură | °C | 650 / 750 / 850 | 650 / 750 / 850 |
| Presiune | bar | 1,013 | 1,013 |
| Greutate probă | gr | 10 | 6,25 |
| Cantitate aer | 1 | 15,88 | 15,88 |
| Debit aer | l/min | 1 | 1 |
| Durată proces | min:sec | 15:53 | 15:53 |

Tabel 3.5: Parametrii proceselor de gazeificare cu aer a deșeului de tip food court - regim tranzitoriu

În figurile 3.21. și 3.22. sunt prezentate regimurile tranzitorii ale proceselor de gazeificare cu aer a FCW la 750°C și diferite valori ale ER. Valoarea ratei echivalente de aer nu influențează durata etapelor de încălzire și de combustie și devolatilizare. Aceste două etape sunt influențate în schimb de temperatura procesului de gazeificare. Creșterea valorii ratei echivalente de aer influențează negativ concentrația instantanee maximă a speciilor gazoase formate, dioxid de carbon, monoxid de carbon și hidrogen, similar cazului prezentat anterior.



Figura 3.21. Gazeificare cu aer a deșeului de tip food court – regim tranzitoriu – 750°C; ER = 0.25











Ținând cont de rezultatele obținute în acest subcapitol și prezentate în graficele de mai sus se poate afirmă că parametrii optimi de proces pentru gazeificarea cu aer a FCW sunt ER = 0.25 și temperatura procesului de 850°C.

3.1.1.6. Gazeificare cu aer/abur a deșeului de tip food court

Pentru a observa influența producției de hidrogen în gazul produs în funcție de tipul agentului de gazeificare utilizat (aer sau abur) au fost efectuate experimente de gazeificare a deșeului de tip food court la 750 și 850° C și ER = 0,30 (în cazul procesului de gazeificare cu

abur, echivalentul cantității de oxigen introdusă în proces în cazul unui ER de 0,30). Ambele procese au fost efectuate la aceiași parametri, inclusiv cantitatea de oxigen introdusă în proces, singura diferență fiind constituită de agentul oxidant. A fost calculat necesarul de aer pentru un proces de gazeificare cu aer a 10 grame de FCW și oxigenul conținut de această cantitate de aer. Apoi, a fost calculată cantitatea de abur necesară a fi introdusă în proces pentru a asigura aceiași cantitate de oxigen în reactor. Parametri de proces aleși și calculați sunt prezentați în Tabel 3.6.

| tranzitorra | | | | | | |
|------------------------|-------------|---------------|--|--|--|--|
| Agentul oxidant | Aer | Abur | | | | |
| Temperatura procesului | 750 / 850°C | 750 / 850°C | | | | |
| Presiunea procesului | 1,013 bar | 1,013 bar | | | | |
| Greutatea probei | 10 gr | 10 gr | | | | |
| ER | 0,3 | - | | | | |
| Cantitatea de aer/apă | 19,051 | 6,3384 ml | | | | |
| Debitul de aer/apă | 1 l/min | 0,3336 ml/min | | | | |
| Durata procesului | 19 min | 19 min | | | | |

Tabel 3.6: Parametrii proceselor de gazeificare cu aer/abur a deșeului de tip food court – regim tranzitoriu

În figurile 3.25. și 3.26., sunt prezentate regimurile tranzitorii ale proceselor de gazeificare cu aer, și respectiv abur, a deșeului de tip food court la 850° C. În cazul proceselor de gazeificare cu abur, comparativ cu cele care utilizează aerul ca agent de proces, concentrația de oxigen scade la începutul procesului, apoi începe să crească rămânând la o valoare destul de ridicată până la finalul procesului. Ținând cont de faptul că reacțiile dintre vaporii de apă și carbonul solid sunt considerabil mai lente decât cele dintre aer (O₂) și carbon, este posibil ca în cazul procesului de gazeificare cu abur, timpul de rezidență să fie prea scurt. Oxigenul nu are timp să reacționeze cu proba în etapa de gazeificare a cocsului și iese nereacționat din reactor.



Figura 3.28. Variația concentrației de hidrogen - gazeificare cu aer și abur a FCW

Din graficele de mai sus se pot determina parametrii optimi de proces în cazul procesului de gazeificare a deșeului de tip food court la o rată echivalentă de oxigen de 0,30, astfel avem: temperatura procesului de 850°C și agentul oxidant utilizat aburul.

3.1.1.7. Concluzii

În cadrul acestui subcapitol au fost studiate regimurile tranzitorii ale proceselor de gazeificare cu aer sau abur a trei categorii de materiale în diferite condiții de proces. Materialele analizate au fost lemnul de plop, tulpinile și reziduurile de rapiță și deșeul de tip food court. Temperaturile de proces au variat între 650°C, 750°C și 850°C, iar rata echivalentă de aer a variat între 0,25 și 0,4, cu pas de 0,05. Presiunea procesului a fost, în toate cazurile studiate, presiunea atmosferică, iar agentul oxidant utilizat a fost aerul sau aburul. Cantitatea de abur introdusă în proces (SBR) nu a fost una tipică unui proces continuu de gazeificare (SBR = 1:1 \div 5:1), aceasta fiind calculată astfel încât cantitatea de oxigen introdusă în proces cu aburul să fie echivalentă cantității de oxigen introdusă în proces cu aerul. În acest fel, în cazul proceselor de gazeificare comparate, singura diferență a fost reprezentată de tipul agentului oxidant.

Regimul tranzitoriu al unui proces de gazeificare ajută la studierea și înțelegerea fenomenelor care au loc în decursul unui proces de gazeificare, la caracterizarea și compararea proceselor de gazeificare în diferite condiții, la determinarea compoziției gazului primar și la determinarea parametrilor optimi de proces pentru inițierea gazeificării diferitelor materiale studiate în condițiile propuse.

Pentru aceste experimente, lemnul de plop a fost ales ca termen de comparație pentru celelalte două materiale studiate. Lemnul de plop și-a dovedit capabilitatea de a fi utilizat ca materie primă în procesele de gazeificare. Astfel, regimul tranzitoriu al lemnului a servit drept model de referință pentru materialele noi studiate. Valorile ratei echivalente de aer și ale temperaturii au fost alese dintre cele mai uzuale valori utilizate în gazeificarea cu aer a lemnului.

Tulpinile și reziduurile de rapiță, precum și deșeul de tip food court au fost analizate pentru a determina posibilitatea utilizării acestora drept surse de energie primară în procesele de conversie termo-chimică. Rezultatele au demonstrat că aceste deșeuri agricole și municipale pot fi utilizate cu succes pentru producerea unui gaz cu proprietăți bune de ardere. Proprietățile fizico-chimice ale deșeurilor agricole și municipale studiate (conținut ridicat de substanțe volatile, conținut relativ scăzut de cenușă, compoziție chimică asemănătoare cu cea lemnului), le avantajează în procesele de gazeificare, iar regimurile tranzitorii ale acestora sunt asemănătoare cu cele ale unui lemn (plop). Totodată, concentrațiile instantanee maxime ale gazelor combustibile, obținute în urma gazeificării tulpinilor și reziduurilor de rapiță și a FCW au fost mai mari, comparativ cu cele înregistrate pentru lemnul de plop. În consecință putem afirma că forma intermediară a gazului obținut în urma proceselor de gazeificare a celor două categorii noi de materiale studiate are proprietăți mai bune de ardere, comparativ cu cea obținută pentru lemnul de plop, care este deja utilizat drept materie primă pentru obținerea singazului.

Conform rezultatelor obținute în urma efectuării experimentelor de gazeificare parametrii optimi de proces pentru gazeificarea tulpinilor de rapiță sunt temperatură 850°C, ER echivalent de 0,30, agentul de gazeificare utilizat fiind aburul. La acești parametrii de proces se înregistrează cele mai mari valori ale concentrației instantanee de monoxid de carbon și hidrogen. De asemenea, hidrogenul este produs pe aproape întreaga durată a procesului, nu doar în etapa de combustie și piroliză, astfel cantitativ se va regăsi în procent mai mare hidrogenul în gazul produs.

În cazul proceselor de gazeificare a deșeului de tip food court – regim tranzitoriu – cele mai bune rezultate au fost obținute la 850°C, ER echivalent de 0,30 și agentul oxidant utilizat aburul. Dacă aburul nu poate fi utilizat în procesele de gazeificare, pentru procesele de gazeificare cu aer a FCW parametrii optimi de proces sunt: temperatură 850°C și ER = 0,25.

3.2. EFICIENȚA PROCESULUI DE GAZEIFICARE

Procesul de gazeificare poate fi evaluat în funcție de calitatea gazului obținut, de eficiența de conversie și de eficiența energetică a procesului. Pentru a evalua procesul de gazeificare din punct de vedere al calității gazului se analizează compoziția gazului și puterea calorifică inferioară a acestuia. Compoziția gazului produs este influențată de o multitudine de factori și parametri ai procesului, printre care se numără: compoziția materialului gazeificat, tipul agentului de gazeificare utilizat, raportul dintre oxidant și combustibil, temperatura și presiunea procesului, timpul de rezidență, tipul reactorului [17, 19, 67].

Pentru a evalua procesul de gazeificare din punct de vedere al eficienței de conversie și al eficienței energetice se pot calcula trei factori [17, 19, 67, 173]:

- Eficiența de conversie a carbonului (carbon conversion efficiency CCE)
- Randamentul energetic al procesului fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut (cold-gas efficiency CGE)
- Randamentul energetic al procesului cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut (hot-gas efficiency HGE)

Eficiența de conversie a carbonului este procentul de carbon din combustibil care este transformat în produși ai singazului în urma procesului de gazeificare și poate fi exprimat astfel [19, 67]:

$$CCE = \frac{Carbonul \operatorname{conținut în produșii de gazeificare [kmol]}}{Carbonul \operatorname{conținut de combustibil [kmol]}} * 100$$
(3.1)

sau dacă se ține cont de carbonul nears din cenușă [16, 17]:

$$CCE = \left(1 - \frac{Carbonul \operatorname{conținut} \hat{n} \operatorname{reziduurile} \operatorname{de gazeificare} [kmol]}{Carbonul \operatorname{conținut} \operatorname{de combustibil} [kmol]}\right) * 100$$

Pentru a calcula CCE trebuie să se determine o serie de date, printre care se numără: compoziția gazului produs, cantitatea de gaz produsă, cantitatea de carbon conținută de gaz etc. Cantitatea de gaz produsă poate fi determinată prin două metode:

- Metoda 1: Cunoscând cantitatea de gaz produsă (determinată din bilanțul masic), exprimată în unități de masă, și a masei molare a gazului;
- Metoda 2: Cunoscând cantitatea de azot introdusă în procesul de gazeificare și concentrația de azot în gazul produs.

Pentru determinarea CCE este necesară cunoașterea cantității de substanță (gaz produs) exprimată în moli. În funcție de metoda de calcul aleasă pentru determinarea cantității de substanță, au rezultat două valori ale acesteia, CCE fiind calculat utilizând ambele valori.

Randamentul energetic al procesului fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut (CGE) al unui proces de gazeificare reprezintă raportul dintre energia chimică a gazului produs și energia chimică a materialului gazeificat, fiind exprimată astfel [16, 17, 19, 67, 173]:

$$CGE = \frac{PCI_{gaz} * M_{gaz}}{PCI_{cb} * M_{cb}}$$

(3.2)

(3.3)

unde, PCI_{gaz} reprezintă puterea calorifică a gazului produs, PCI_{cb} puterea calorifică a combustibilului utilizat, M_{gaz} reprezintă masa de gaz produsă în urma gazeificării a M_{cb} kg de combustibil.

Datorită temperaturilor mari la care are loc procesul de gazeificare, gazul produs de majoritatea tipurilor de reactoare are o temperatură foarte ridicată la evacuare, având un

conținut important de energie sensibilă. În aplicațiile în care această energie sensibilă poate fi utilizată (într-un cuptor sau cazan), poate fi definit randamentul energetic al procesului cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut (HGE), care ține cont atât de energia chimică cât și de cea sensibilă a gazului produs, astfel avem [19, 67, 173]:

$$HGE = \frac{PCI_{gaz} * M_{gaz} + M_{gaz} * c_{p_{gaz}} * (T_{gaz} - T_{cb})}{PCI_{cb} * M_{cb}}$$
(3.4)

unde, $c_{p_{gaz}}$ reprezintă căldura specifică a gazului produs, T_{gaz} reprezintă temperatura gazului la ieșirea din reactorul de gazeificare, iar T_{cb} reprezintă temperatura combustibilului la intrarea în reactorul de gazeificare.

Deși experimentele efectuate nu simulează un proces complet de gazeificare, pot fi calculate randamentele energetice ale procesului. Valorile acestora diferă mult față de valorile obținute pentru un proces tipic de gazeificare, dar pot fi utilizate pentru caracterizarea proceselor de gazeificare și observarea influenței parametrilor asupra procesului.

3.2.1. Eficiența de conversie a biomasei și randamentele energetice ale procesului de gazeificare cu aer a lemnului de plop

În cadrul acestui subcapitol au fost calculate eficiența de conversie a carbonului și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer a lemnului de plop, la diferite temperaturi ale procesului și la diferite valori ale ratei echivalente de aer.

În Figura 3.29, și respectiv în Figura 3.30, este prezentată variația eficienței de conversie a carbonului în procesele de gazeificare cu aer a lemnului de plop, în funcție de parametrii de proces, calculată prin două metode.

Figura 3.29. Eficiența de conversie a carbonului (1) - proces de gazeificare cu aer a lemnului de plop

Din figurile de mai sus se poate observa că indiferent de metoda de calcul aleasă, cea mai mare valoare a CCE se obține pentru procesul de gazeificare cu aer la 750°C și ER = 0,30. Indiferent de metoda de calcul aleasă a cantității de substanță și de valoarea ratei echivalente de aer, CCE se maximizează la o temperatură a procesului de 750°C.

Figura 3.31. Randamentul energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer a lemnului de plop

Figura 3.32. Randamentul energetic cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer a lemnului de plop

Cele mai mari valori ale lui CGE sunt obținute pentru procesele de gazeificare cu aer a lemnului de plop la 750°C și ER = 0,30, și respectiv la 850°C și ER = 0,25/0,30. În cazul HGE, cele mai mari valori sunt obținute în cazul proceselor de gazeificare la 850°C și ER = 0,30, și respectiv la 850°C și ER = 0,25.

3.2.2. Eficiența de conversie a biomasei și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor și reziduurilor de rapiță

În cadrul acestui subcapitol au fost calculate eficiențele de conversie a carbonului și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor și reziduurilor de rapiță, la diferite temperaturi ale procesului și la diferite valori ale ratei echivalente de aer.

Figura 3.34. Eficiența de conversie a carbonului (2) - proces de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță

Indiferent de metoda de calcul aleasă, CCE se maximizează la 850° C și ER = 0,30, în cazul proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță. Eficiența de conversie a carbonului crește la creșterea temperaturii, pentru fiecare valoare a ER, și la creșterea ER-ului.

În figurile de mai sus este prezentată variația valorii CCE în procesele de gazeificare cu aer a reziduurilor de rapiță, în funcție de parametrii de proces. Valoarea CCE este calculată utilizând cele două metode prezentate anterior. În ambele cazuri CCE se maximizează la 750°C și ER de 0,25, și la 850°C și ER de 0,30.

Atât pentru tulpinile de rapiță cât și pentru reziduurile de rapiță, valorile CCE obținute prin prima metodă de calcul sunt cuprinse în intervalul 60-80%, iar valorile CCE obținute utilizând cea de-a doua metodă de calcul sunt cuprinse între aproximativ 55 și 75%. Indiferent de metoda de calcul aleasă pentru determinarea cantității de gaz produsă, eficiența de conversie a carbonului se maximizează la ER = 0,30 și temperatura procesului de 850°C, pentru ambele materiale.

În Figura 3.37, și respectiv Figura 3.38, este prezentat randamentul energetic fără, și respectiv cu, recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut în procesele de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță.

Figura 3.37. Randamentul energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță

Figura 3.38. Randamentul energetic cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță

La temperaturi mai mici ale procesului, 650-750°C, atât valorile CGE, cât și valorile HGE nu sunt influențate de valoarea ratei echivalente de aer. Cele mai mari valori ale randamentelor energetice sunt obținute la 850°C și ER = 0,30.

În figurile de mai jos este prezentată variația CGE și HGE în funcție de parametrii de proces la gazeificarea cu aer a reziduurilor de rapiță.

Figura 3.39. Randamentul energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer a reziduurilor de rapiță

Cele mai mari valori ale randamentului energetic fără, și respectiv cu, recuperarea căldurii sensibile a gazului sunt obținute pentru procesul de gazeificare cu aer a reziduurilor de rapită la 850° C și ER = 0,30.

3.2.3. Eficiența de conversie a biomasei și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță având conținut de umiditate diferit

În cadrul acestui subcapitol au fost determinate bilanțul masic, eficiența de conversie a carbonului și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță având conținut diferit de umiditate, la diferite temperaturi ale procesului.

În Figura 3.41 și Figura 3.42 este prezentată influența temperaturii procesului și a conținutului de umiditate al materialului studiat asupra CCE – două metode de calcul.

Utilizând prima metodă de calcul a CCE se poate observa că eficiența de conversie a carbonului nu este influențată deloc de conținutul de umiditate al probei, ci numai de creșterea temperaturii. Din cel de-al doilea grafic de mai sus se poate observa că CCE este influențat negativ de creșterea conținutului de umiditate al probei, și pozitiv de creșterea temperaturii, dacă CCE este calculat cu cea de-a doua metodă. Conținutul de umiditate al probei influențează chiar și cu 8-9 puncte procentuale valoarea eficienței de conversie a carbonului, în procesele de gazeificare la 850°C.

Din graficele de mai jos se poate observa că atât variația CGE, cât și variația HGE, în funcție de temperatură este aproximativ liniară. Ambele randamente energetice calculate cresc la creșterea temperaturii procesului, iar valorile acestora nu sunt influențate de conținutul de umiditate al probei.

Figura 3.43. Randamentul energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță cu conținut de umiditate diferit Figura 3.44. Randamentul energetic cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță cu conținut de umiditate diferit

Cele mai mari valori ale randamentului energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului sunt obținute pentru procesele de gazeificare la 850°C, acestea depășind cu puțin 20%. Și în cazul HGE, cele mai mari valori obținute sunt în cazul procesului de gazeificare la 850°C, acestea siuându-se în jurul valorii de 40,5%.

3.2.4. Eficiența de conversie a biomasei și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu abur a tulpinilor de rapiță

În cadrul acestui subcapitol au fost determinate bilanțul masic, eficiența de conversie a carbonului și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu abur a tulpinilor de rapiță uscate, la diferite temperaturi ale procesului.

În Figura 3.45, și respectiv Figura 3.46, este prezentată variația eficienței de conversie a carbonului în procesele de gazeificare cu abur a tulpinilor de rapiță uscate, la diferite temperaturi, comparativ cu procesele de gazeificare cu aer la aceiași parametrii de proces.

CCE crește la creșterea temperaturii în cazul proceselor de gazeificare cu abur, dar valorile acestuia sunt considerabil mai mici, comparativ cu valorile obținute pentru aceiași

parametrii de proces în cazul gazeificării cu aer. Acest lucru se datorează timpului de rezidență mult prea scurt pentru procesele de gazeificare cu abur.

În figurile de mai jos sunt prezentate variațiile CGE și HGE în procesele de gazeificare cu aer și abur a tulpinilor de rapiță uscate, la ER (ER echivalent) = 0,30 și temperatura procesului de 750, și respectiv 850°C. Cele două randamente energetice cresc la creșterea temperaturii procesului, indiferent de agentul oxidant utilizat, însă în cazul utilizării aburului se obțin valori mai mici ale randamentelor.

Figura 3.47. Randamentul energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu abur vs. aer a tulpinilor de rapiță

Figura 3.48. Randamentul energetic cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu abur vs. aer a tulpinilor de rapiță

Utilizarea aburului ca agent oxidant în procesele de gazeificare a tulpinilor de rapiță uscate, conduce la o scădere a CGE, și respectiv HGE, cu aproximativ 3, și respectiv 7, puncte procentuale, comparativ cu valorile obținute pentru procesul de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță.

3.2.5. Eficiența de conversie a biomasei și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer a deșeului de tip food court

În cadrul acestui subcapitol au fost determinate bilanțul masic, eficiența de conversie a carbonului și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer a deșeului de tip food court, la diferite temperaturi ale procesului și diferite valori ale ratei echivalente de aer.

În Figura 3.49 și în Figura 3.50, sunt prezentate variațiile CCE în funcție de temperatură și ER în procesele de gazeificare cu aer a FCW. Indiferent de metoda de calcul a CCE, se observă o creștere a acestuia la creșterea temperaturii. În cazul procesului de gazeificare la 850° C și ER = 0,40 diferența dintre valorile CCE obținute utilizând cele două metode calcul este de 16 puncte procentuale.

În Figura 3.51, și respectiv Figura 3.52, este prezentată variația CGE, și respectiv HGE, în funcție de temperatură și ER în procesele de gazeificare cu aer a deșeului de tip food court. Randamnetul energetic al procesului de gazeificare, fără sau cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut, crește la creșterea temperaturii procesului și la creșterea valorii ratei echivalente de aer.

Figura 3.51. Randamentul energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obtinut – proces de gazeificare cu aer a deseului de tip food court

Figura 3.52. Randamentul energetic cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut proces de gazeificare cu aer a deseului de tip food court

Cresterea valorii ER conduce la o crestere a CGE, si respectiv a HGE, la aceiasi temperatură a procesului cu până la aproximativ 4, si respectiv 9 puncte procentuale. Cresterea temperaturii procesului de la 650°C la 850°C conduce la o creștere a CGE, și respectiv a HGE, de aproximativ 5-8, si respectiv 14-19, puncte procentuale. Cele mai mari valori ale randamentelor se obțin la 850°C și ER de 0,40.

3.2.6. Eficiența de conversie a biomasei și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer sau abur a deseului de tip food court

În cadrul acestui subcapitol au fost determinate bilantul masic, eficienta de conversie a carbonului și randamentele energetice ale proceselor de gazeificare cu aer sau abur a deșeului de tip food court, la diferite temperaturi ale procesului.

În Figura 3.53 și Figura 3.54 sunt prezentate variațiile eficienței de conversie a carbonului, calculate în cele două moduri, în procesele de gazeificare a deșeului de tip food court în funcție de temperatura procesului și agentul oxidant utilizat.

Figura 3.53. Eficiența de conversie a carbonului (1) - proces de gazeificare cu aer vs. abur a FCW (2) - proces de gazeificare cu aer vs. abur a FCW

Figura 3.54. Eficienta de conversie a carbonului

Eficienta de conversie a carbonului este mai mare în cazul proceselor de gazeificare a FCW cu aer, aceasta crescând putin la cresterea temperaturii. CCE înregistrează valori mult mai mici în cazul proceselor de gazeificare cu abur, aceasta scăzând la creșterea temperaturii, în intervalul analizat.

În figurile de mai jos sunt prezentate variațiile randamentelor energetice ale proceselor de gazeificare cu aer/abur a deșeului de tip food court la diferite temperaturi ale procesului. Atât CGE, cât si HGE, sunt influentate de temperatura procesului si de agentul oxidant utilizat. Randamentul energetic creste la cresterea temperaturii procesului în ambele cazuri, dar valorile obținute pentru procesele de gazeificare cu abur sunt mult mai mici, comparativ cu cele obținute pentru procesele de gazeificare cu aer, în intervalul de temperatură analizat.

Figura 3.55. Randamentul energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer sau abur a deșeului de tip food court Figura 3.56. Randamentul energetic cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut – proces de gazeificare cu aer sau abur a deșeului de tip food court

CGE scade cu aproximativ 3-5 puncte procentuale, iar HGE scade cu 8-10 puncte procentuale, când aburul este utilizat în proces, pe când creșterea cu 100°C a temperaturii procesului conduce la o creștere a CGE, și respectiv a HGE, de maxim două, și respectiv aproximativ 6-8, puncte procentuale.

3.2.7. Concluzii

În cazul proceselor de gazeificare cu aer analizate, producția de gaz depăşeşte 94%, rezultat cumva de așteptat, ținând cont de faptul că principalul produs obținut în urma proceselor de gazeificare este gazul. Producția de gaz este în mare parte influențată de temperatura procesului, aceasta crescând la creșterea temperaturii. La temperaturi mai mari ale procesului eficiența de conversie a materialului solid în gaz crește. În cazul proceselor de gazeificare cu abur producția de gaz este mai mică, în unele de cazuri, de 90%. Acest lucru se datorează duratei procesului (timpul de rezidență). Datorită vitezei de reacție mai scăzută a aburului cu carbonul solid din cocs, comparativ cu reacția oxigenului din aer cu carbonul, materialul a fost convertit într-o mai mică măsură, ducând astfel la o producție mai mică de gaz. În cazul utilizării aburului ca agent oxidant în procesele de gazeificare, timpul de rezidență trebuie mărit pentru a asigura timpul necesar reacțiilor să aibă loc.

Eficiența de conversie a carbonului a fost determinată utilizând două metode de calcul. O metodă ține cont de cantitatea de gaz produsă, determinată cu ajutorul bilanțului masic. Cealaltă metodă de calcul ține cont de cantitatea de gaz produsă determinată prin calcul în funcție de cantitatea de azot introdusă în proces și concentrația de azot în gazul produs. În funcție de experimentul de gazeificare analizat se pot obține valori mai bune al CCE fie aplicând o metodă, fie cealaltă.

Eficiența de conversie a carbonului tinde să crească la creșterea temperaturii și a valorii ratei echivalente de aer, în cazurile studiate. Temperatura mai mare a procesului asigură o viteză de reacție mai mare, iar cantitatea mai mare de aer introdusă în proces asigură mai mult oxigen disponibil în reactor, pentru reacțiile de oxidare a carbonului. Utilizarea aburului ca agent oxidant duce la scăderea CCE în condițiile studiate. După cum am menționat mai sus, pentru o mai bună eficiență de conversie în procesele de gazeificare, fie că este vorba de eficiența de conversie a materialului, fie că este vorba de eficiența de conversie strict a carbonului, utilizarea aburului ca agent oxidant în proces impune o durata mai îndelungată a procesului, pentru îmbunătățirea rezultatelor obținute.

Valorile numerice obținute sunt mici, comparativ cu valorile CGE și HGE pentru procesele tipice de gazeificare, acest fapt se datorează tipului experimentelor efectuate. După cum am precizat anterior, în interiorul instalației de laborator utilizată nu are loc un proces complet de gazeificare. Astfel, valorile randamentelor energetice sunt calculate pe baza unor compoziții intermediare ale gazului, reprezentând practic randamentele unor etape ale procesului de gazeificare, nu a întregului proces.

Cu toate acestea, valorile randamentelor energetice calculate pot fi utilizate pentru caracterizarea proceselor de gazeificare și observarea influenței parametrilor de proces asupra gazului obținut.

De regulă, diferența dintre CGE și HGE, într-un proces tipic de gazeificare, este de aproximativ 10-20 puncte procentuale. Dacă analizăm rezultatele obținute în cadrul acestui subcapitol, se poate observa că aceiași tendință se observă și aici între CGE și HGE.

Conform valorilor rezultate pentru randamentele energetice ale proceselor, parametri optimi de proces sunt:

- Gazeificare cu aer a lemnului de plop: temperatură 850° C, ER = 0,30;
- Gazeificare cu aer a tulpinilor de rapită: temperatură 850° C, ER = 0,30;
- Gazeificare cu aer a reziduurilor de rapiță: temperatură 850° C, ER = 0,30:
- Gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță având conținut de umiditate diferit: temperatură 850°C;
- Gazeificare cu abur a tulpinilor de rapiță uscate: temperatură 850°C;
- Gazeificare cu aer a deșeului de tip food court: temperatură 850° C, ER = 0,40;
- Gazeificare cu aer și abur a deșeului de tip food court: temperatură 850°C, agent oxidant aer.

3.3. ARDEREA COMBUSTIBILILOR PRODUȘI PRIN GAZEIFICARE

Principalul produs obținut în urma procesului de gazeificare este, după cum am precizat în capitolele anterioare, gazul de sinteză. Acesta poate fi valorificat energetic prin ardere în instalații echipate cu motoare cu ardere internă sau cu turbine cu gaze.

Ca și în cazul procesului de combustie a combustibililor solizi, pentru determinarea necesarului de aer de ardere, dar și pentru determinarea volumelor de gaze de ardere produse, este necesară efectuarea unui calcul de ardere. Calculul de ardere al combustibililor gazoși se face pornind de la compoziția combustibilului gazos dată în procente volumice și a ecuațiilor stoichiometrice de reacție a fracțiilor combustibile [205].

Calculul procesului de ardere a fost realizat pentru următoarele trei tipuri de gaze: gaz metan, Singaz 1 (gaz obținut în urma gazeificării cu aer a lemnului de plop uscat) și Singaz 2 (gaz obținut în urma gazeificării cu aer a lemnului de plop având o umiditate de 30%).

| | | Metan | Singaz 1 | Singaz 2 |
|-----------------|-------|--------|----------|----------|
| СО | [%] | Wietun | 25 | 22.4 |
| CO ₂ | [%] | | 20 | 13.8 |
| CH ₄ | [%] | 100 | 2 | 2.8 |
| H ₂ | [%] | | 11 | 16.2 |
| N_2 | [%] | | 42 | 44.8 |
| PCI | kJ/kg | 49896 | 4022,2 | 4852,1 |

| Tabel 3.7: | Compozițiile | gazelor |
|------------|--------------|---------|
|------------|--------------|---------|

În urma efectuării calculului de ardere pentru combustibilii gazoși prezentați în tabelul de mai sus au fost determinate volumul de aer umed necesar arderii și volumele de gaze de ardere pentru fiecare combustibil.

arderii combustibililor gazoși

ardere

În Figura 3.57 este prezentat volumul de aer umed necesar arderii celor trei combustibili gazoși. Analizând valorile prezentate în grafic putem observa că în cazul arderii Singaz 1 necesarul de aer reprezintă doar 11% din necesarul de aer umed pentru arderea metanului, iar în cazul arderii Singaz 2 necesarul de aer reprezintă doar 12,45% din necesarul de aer umed pentru arderea metanului. Acest lucru se datorează compozițiilor diferite ale celor trei tipuri de gaze. În compozițiile celor două tipuri de singaz, metanul (CH₄) se regăsește în proporție foarte mică, 2 și respectiv 2,8%, iar gazele necombustibile se regăsesc în proporție de 62 și respectiv 58,6%. Având un conținut atât de mare de gaze necombustibile este de așteptat ca volumul de aer umed necesar arderii să fie mult mai mic, pentru singaz, comparativ cu metanul. De asemenea, cele două tipuri de singaz au în compoziția lor monoxid de carbon și hidrogen. În urma arderii unității de volum de monoxid de carbon sau hidrogen, necesarul de aer de ardere este de patru ori mai mic, comparativ cu necesarul de aer de ardere pentru arderea unității de volum de metan.

În Figura 3.58 este prezentat volumul real total al gazelor de ardere degajate în urma arderii unității de volum de metan sau singaz. În urma arderii unității de volum de Singaz 1 sau Singaz 2, rezultă un volum de gaze de ardere de aproximativ 5,50 ori mai mic, comparativ cu arderea metanului. Acest lucru era de asteptat întrucât necesarul de aer de ardere este mai mare în cazul arderii metanului, iar bilanțul masic trebuie să se respecte.

3.4. CONVERSIA COMBUSTIBILILOR GAZOSI ÎN INSTALAŢII DE TURBINE CU GAZE

Pentru valorificarea energetică a singazului a fost aleasă turbina cu gaze cu recuperare internă de căldură de tip Solar Mercury 50 cu o putere unitară de 4,6 MW [207]. Nivelul de putere a fost ales corelat cu potențialul de energie specifică unei surse de biomasă lemnoasă sau agricolă. În general, aplicațiile energetice care utilizează drept combustibil biomasa (exclusiv deseurile solide asimilate acesteia) sunt limitate de disponibilul de biomasă pe amplasament la puteri de până la 20MW. Uzual termocentralele pe biomasă au puteri între 3 și 10 MW_{el}.

În cadrul acestui subcapitol a fost calculată puterea electrică netă produsă și consumul compresorului de gaz în cazul utilizării a diferite tipuri de gaze. Sunt propuse patru ipoteze de calcul: alimentare cu metan la 2 bar, alimentarea cu metan la 4 bar, alimentare cu Singaz 1 și alimentare cu Singaz 2, pentru a vedea comportamentul turbinei în diferite condiții. Randamentele camerei de ardere, a recuperatorului intern, randamentul intern al compresorului și randamentul intern al turbinei sunt considerate constante, indiferent de tipul de gaz folosit, valorile acestora fiind prezentate în tabelul următor, precum și celelalte ipoteze de calcul.

| Domomotimy | | Metan | | Singaz | | |
|-------------------------------------|------|-------|------|--------|------|--|
| Farametru | U.M. | | | 1 | 2 | |
| Temperatură gaz | °C | 10 | 10 | 45 | 45 | |
| Presiune gaz | bar | 2 | 4 | 1 | 1 | |
| Randament CC | % | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| Randament RI | % | 99 | 99 | 99 | 99 | |
| Randament intern compresor | % | 85 | 85 | 85 | 85 | |
| Randament intern turbină | % | 85 | 85 | 85 | 85 | |
| Raport temperaturi absolute extreme | - | 4,83 | 4,83 | 4,83 | 4,83 | |
| Eficiența RI | % | 87,5 | 87,5 | 87,5 | 87,5 | |

Tabel 3.8: Ipoteze calcul

Temperatura și presiunea de alimentare a gazului a natural au fost alese în funcție de condițiile de amplasament ale centralei. Astfel, au fost aleși parametri corespunzători în funcție de parametrii rețelei de transport și distribuție a gazului natural. Temperatura și presiunea de alimentare cu singaz sunt specifice singazului provenit de la instalația de conversie (reactor de gazeificare).

Pentru efectuarea calculului instalației de turbină cu gaze s-a considerat că aceasta este alimentată cu gaz metan, iar puterea la bornele generatorului este de 4600 kW. Astfel, au fost determinate debitele necesare de combustibil și aer de ardere, precum și debitul masic de gaze de ardere, puterea electrică netă produsă și consumul compresorului de gaz.

Pentru a determina consumul compresorului de gaz, și implicit puterea electrică netă produsă, în cazul alimentării cu singaz a instalației de turbină cu gaze, se consideră că volumul ocupat de gazele de ardere în camera de ardere este egal cu volumul ocupat de gazele de ardere rezultat în urma arderii gazului natural. Astfel, se determină prima oară debitul de gaze de ardere, apoi se recalculează randamentele și puterea la bornele generatorului, în cazul utilizării singazului drept combustibil.

În Figura 3.59 sunt prezentate debitele masice de intrare, și respectiv de ieșire, în, și respectiv din, instalația de turbină cu gaze, în cele patru cazuri studiate. Debitele masice de intrare sunt reprezentate de fluxurile de combustibil și aer de ardere, iar debitul de ieșire este reprezentat de fluxul de gaze de ardere. Debitul de gaz metan este de 0,24 kg/s, însă debitele de singaz cresc de până la aproximativ 13 ori. Acest lucru se datorează puterii calorifice scăzute a gazului de tip singaz, comparativ cu gazul natural. Pentru a putea asigura aceiași putere termică în interiorul camerei de ardere este necesară creșterea debitului de alimentare cu combustibil.

Figura 3.59. Debite masice intrare/ieșire la ITG

Figura 3.60. Consum compresor gaz

Necesarul de aer de ardere este mai mic în cazul arderii gazului de tip singaz, întrucât acesta are în compoziția sa elemente necombustibile în proporții destul de mari. Debitul de aer în ITG alimentate cu singaz reprezintă aproximativ 87-90% din debitul de aer necesar unei instalații alimentate cu metan. Din cauza necesarului de combustibil mult mai mare, în cazul unei ITG alimentate cu singaz, comparativ cu ITG alimentat cu metan, debitul de gaze de ardere este mai mare. Acesta este de 18,48 kg/s în cazul în care instalația este alimentată cu Singaz 1

și 18,22 kg/s în cazul în care instalația este alimentată cu Singaz 2, comparativ cu instalațiile alimentate cu metan, al căror debit de gaze de ardere este de 17,78 kg/s.

În Figura 3.60 este prezentat consumul compresorului de gaz în cele patru cazuri studiate. Consumul compresorului de gaz se reduce cu aproximativ 40% în cazul alimentării cu metan la 4 bar, comparativ cu primul caz analizat – metan 2 bar. Cu toate acestea, în cazul utilizării gazului metan, consumul compresorului de gaz este foarte redus, ceea ce conduce la randamente nete foarte bune. În cazul alimentării cu singaz a instalației de turbină cu gaze, din cauza debitului foarte mare de combustibil, consumul compresorului de gaz este foarte ridicat, 1397, și respectiv 1255 kW. Întrucât o mare parte din energia produsă la generator se pierde cu alimentarea compresorului de gaz, energia electrică netă produsă și implicit randamentul net al instalației, sunt mai scăzute, în cazul utilizării singaz, comparativ cu cazul utilizării gazului metan.

În cazul alimentării instalației cu metan la 2 bar, și respectiv cu metan la 4 bar, consumul compresorului reprezintă 2,34%, și respectiv 1,35%, din puterea la bornele generatorului. În cazul alimentării instalației cu Singaz 1, și respectiv cu Singaz 2, consumul compresorului reprezintă 26,36%, și respectiv 24,21%, din puterea la bornele generatorului. În concluzie, utilizarea singazului în ITG crește consumul compresorului cu peste 20 de puncte procentuale, comparativ cu cazul utilizării gazului natural. Acest lucru se datorează debitelor necesare de singaz mai mari.

În Figura 3.61 sunt prezentate randamentele brute și nete ale ITG utilizând diferiți combustibili gazoși. Randamentele au fost calculate atât ținând cont (η_{brut} și η_{net}) cât, și fără a ține cont de căldura fizică a combustibilului (η_{brut}^* și η_{net}^*). În cazul utilizării gazului metan pentru alimentarea instalației de producere a energiei electrice se observă că indiferent de presiunea combustibilului la alimentare, randamentul brut este de 38,5%. Randamentul net este mai mic de 37,6%, și respectiv 37,98%, dacă se utilizează metan la presiunea de 2 bar, și respectiv de 4 bar. În cazul utilizării Singaz 1, și respectiv Singaz 2, randamentul brut este de 38,43%, și respectiv 38,63%, iar randamentul net scade considerabil până la valoarea de 28,30%, și respectiv 29,29%.

Există o strânsă legătură între randamentul net și consumul compresorului de gaz. Astfel, cu cât crește consumul compresorului de gaz, randamentul net al instalației va scădea. Totodată, pe măsură ce crește debitul de combustibil, consumul compresorului crește, iar randamentul net scade.

Figura 3.61. Randamente brute și nete

În cazul în care în calcul nu se ține cont de căldura fizică a combustibilului, observăm că randamentele recalculate nu se modifică în cazul utilizării metanului. Însă, în cazul utilizării unui combustibil de tip singaz, randamentele cresc. Astfel, în cazul utilizării Singaz 1 randamentul brut este de 42,70%, iar cel net este de 31,45%, acestea crescând cu mai mult de 4, și respectiv 3, puncte procentuale. În cazul utilizării Singaz 2 atât randamentul brut, cât și randamentul net cresc cu aproximativ 10%, dacă nu se ține cont în calculul acestora de căldura

fizică a combustibilului. De asemenea, din figura de mai sus se poate observa că în cazul utilizării Singaz 2 se obțin randamentele electrice mai mari, comparativ cu cazul utilizării Singaz 1 în ITG.

Figura 3.63. Puterea electrică produsă în ITG

În Figura 3.62 sunt prezentate puterea termică dezvoltată prin arderea combustibilului la CA, puterea termică primită de ciclu de la CA și căldura chimică a combustibilului pentru cele patru cazuri studiate. În cazul alimentării cu metan a ITG se observă că cele trei puteri termice calculate au valori apropiate, în jurul valorii de 11900 kW. Puterea termică dezvoltată prin arderea combustibilului la CA este egală cu căldura chimică a combustibilului, ceea ce înseamnă că, în acest caz căldura fizică a combustibilului este neglijabilă. În cazul utilizării singazului în instalația de producere a energiei electrice echipată cu turbină cu gaze, se observă o diferență notabilă între P_{tc} și P_{tcc}, ceea ce înseamnă că în cazul alimentării cu singaz a ITG, căldura fizică a combustibilului nu este neglijabilă. De asemenea, puterea termică dezvoltată prin arderea combustibilului la CA este mai mare în cazul utilizării singazului drept combustibil, comparativ cu cazul utilizării gazului metan.

În Figura 3.63 sunt prezentate puterea la bornele generatorului și puterea electrică netă produsă în ITG în cele patru cazuri studiate. În cazul utilizării singazului în instalația de turbină cu gaze puterea la bornele generatorului este mai mare, decât în cazul utilizării gazului metan, însă puterea electrică netă este mai mică. Acest lucru se datorează consumului mare de energie al compresorului de gaz, în cazul utilizării singazului drept combustibil.

În cazul utilizării Singaz 2, puterea la bornele generatorului este puțin mai mică, comparativ cu cazul utilizării Singaz 1 (5183 kW versus 5299 kW), însă puterea electrică netă produsă este mai mare (3928 kW versus 3902 kW). Acest lucru se datorează consumului mai mic al compresorului de gaz, în cazul alimentării cu Singaz 2 a instalației de turbină cu gaze (Figura 3.59).

3.5. SOLUȚIA DE CONVERSIE ÎN ENERGIE PRIN GAZEIFICAREA BIOMASEI ÎN INSTALAȚIILE DE MICĂ PUTERE

Pentru a stabili care este soluția optimă de conversie a biomasei în energie electrică trebuie să se țină cont de o serie de factori, printre care se numără și necesarul de biomasă, transportul combustibilului de la sursă la punctul de consum, precum și energia consumată în procesul de pregătire/pre-tratare a biomasei.

În cazul utilizării gazului de sinteză Singaz 1, obținut în urma procesului de gazeificare cu aer a lemnului de plop uscat puterea electrică netă este de 3902 kW. Debitul de alimentare cu combustibil în acest caz fiind de 3,0852 kg/s. În cazul utilizării Singaz 2 (gaz obținut în urma procesului de gazeificare cu aer a lemnului de plop umed) în instalația de turbină cu gaze, puterea electrică produsă este de 3928 kW, la un debit de alimentare cu combustibil de 2,5056 kg/s. Astfel, pentru a produce aproximativ 3,9 MW putere electrică netă, consumul de combustibil scade cu aproximativ 20% dacă se utilizează Singaz 2.

Debitul necesar de biomasă umedă, pentru obținerea Singaz 2, este puțin mai mic decât debitul necesar de biomasă uscată, pentru obținerea Singaz 1. Însă, trebuie să se țină cont că pentru a obține Singaz 1, plopul trebuie uscat în prealabil. Astfel, pentru obținerea debitului necesar de Singaz 1, debitul necesar de biomasă lemnoasă umedă este 1,98 kg/s, cu 46% mai mare decât debitul de biomasă necesar obținerii Singaz 2.

Puterea electrică netă produsă în ITG în cazul utilizării Singaz 2 este puțin mai mare, decât în cazul utilizării Singaz 1. Producerea de gaz de tip Singaz 1, implică uscarea biomasei lemnoase (consum suplimentar de energie), întrucât toate sursele de biomasă au un anumit conținut de umiditate, indiferent de locul și momentul colectării. Prin urmare, soluția optimă de producere a energiei electrice din biomasă via gazeificare, este gazeificarea lemnului de plop umed și valorificarea energetică a gazului obținut în ITG.

CAPITOLUL IV 4. VALORIFICAREA BIOMASEI PRIN ARDERE ÎN CICLURI TERMODINAMICE DE TIP ITA

4.1. ARDEREA BIOMASEI

Pentru determinarea componentelor procesului de ardere (volumul de aer necesar arderii și volumele gazelor de ardere) este necesară cunoașterea compoziției chimice gravimetrice dată în procente a combustibilului analizat ((4.1) [14, 210].

$$C^{i} + H^{i} + O^{i} + N^{i} + S^{i}_{c} + A^{i} + W^{i}_{t} = 100\%$$

(4.1)

În Capitolul III au fost utilizate două tipuri de singaz, ambele obținute în urma gazeificării lemnului de plop. Materiile prime pentru obținerea singazului au fost lemnul de plop uscat și lemnul de plop având o umiditate de 30%. În cadrul acestui va fi determinată puterea electrică produsă în urma valorificării celor două tipuri de lemn în instalații de turbine cu abur.

Pentru a determina necesarul de aer de ardere, precum și volumele de gaze de ardere rezultate în urma arderii lemnului de plop se ține cont de compoziția chimică gravimetrică a acestuia și de ecuațiile procesului de ardere a combustibililor solizi. Rezultatele calculului procesului de ardere a lemnului de plop, atât uscat, cât și având o umiditate de 30%, sunt prezentate în cele ce urmează.

În Figura 4.1, și respectiv Figura 4.2, sunt prezentate volumele, și respectiv masele, de dioxid de carbon, vapori de apă și azot, rezultate în urma arderii unității de masă de combustibil de tip biomasă – lemn de plop. Se observă că atât volumetric, cât și masic, cantitățile de dioxid de carbon și de azot, degajate în urma arderii unității de masă de plop uscat sunt mai mari. Însă, în cazul arderii lemnului de plop cu conținut de umiditate de 30%, volumul vaporilor de apă este peste 10 ori mai mare, comparativ cu volumul vaporilor de apă degajați în urma arderii lemnului uscat.

În Figura 4.3, și respectiv Figura 4.4, este prezentat volumul total, și respectiv masa totală a gazelor de ardere, rezultat în urma arderii unității de masă de plop uscat versus plop având un conținut de umiditate de 30%.

Figura 4.4. Masa totală a gazelor de ardere

Din cele două grafice se poate observa că volumul gazelor de ardere este mai mic, iar masa gazelor de ardere este mai mare, în cazul arderii lemnului de plop uscat, comparativ cu arderea lemnului de plop cu umiditate de 30%. Acest lucru se datorează conținutului mare de vapori de apă în gazele de ardere degajate în urma arderii combustibilului umed.

4.2. CALCULUL CIRCUITULUI TERMOMECANIC

Valorificarea energetică a biomasei lemnoase utilizând ca proces de conversie termochimică combustia, are loc în instalații de turbine cu abur, ce funcționează după ciclul Rankine. Schema fundamentală a unei astfel de instalații include: cazanul sau generatorul de abur, turbina cu abur, generatorul electric, condensatorul și pompa de alimentare. Biomasa este arsă în cazan – reactor de combustie. Căldura degajată în urma arderii biomasei transformă apa în abur, care este apoi destins în turbină, producând lucru mecanic. Generatorul electric are rolul de a transforma energia mecanică în energie electrică, iar condensatorul asigură condensarea vaporilor de apă proveniți de la turbina cu abur. Pentru a crește performanțele unei astfel de instalații, se adaugă schemei inițiale unul mai multe preîncălzitoare regenerative. Scopul acestora este de a preîncălzi apa de alimentare.

În cazul disponibilității unei anumite surse de biomasă care poate fi valorificată energetic într-o instalație de turbină cu abur, se realizează calculul circuitului termo-mecanic, care ține cont, printre altele, de debitul sursei și de proprietățile fizico-chimice ale acesteia. Astfel, se poate determina, puterea electrică produsă în urma arderii cantității disponibile de biomasă. Disponibilul de biomasă considerat este: 1,39 kg/s lemn de plop uscat și 1,36 kg/s, lemn de plop umed. Aceste debite reprezintă necesarul de lemn uscat sau umed pentru a produce Singaz 1, și respectiv Singaz 2. Pentru a determina soluția optimă de conversie biomasă –

energie electrică, în acest capitol am determinat puterea electrică produsă în instalația de turbină cu abur, ținând cont de disponibilul de biomasă și proprietățile acesteia. Astfel, pot fi comparate două lanțuri de conversie biomasă – gazeificare – ITG și biomasă – ardere – ITA, din punct de vedere al producției de energiei electrică în funcție de disponibilul de biomasă.

Calculul circuitul termomecanic presupune calculul presiunii la condensator, determinarea bilanțurilor masice și energetice pe fiecare echipament, precum și destinderea aburului în turbină, și determinarea randamentului global.

Modelul de turbină cu abur ales este Siemens SST-060, specificațiile tehnice de catalog ale turbinei fiind prezentate în Tabel 4.1.

| Parametru | U.M. | Valoare |
|----------------------------------|------|--------------------|
| Putere produsă | MW | ≤ 6 |
| Turație | rpm | $10500 \div 23000$ |
| Parametrii abur viu: | | |
| - Temperatură | °C | ≤ 530 |
| - Presiune | bar | ≤131 |
| Parametrii aburului la evacuare: | | |
| - Condensație | bar | vid |
| - Contrapresiune | | ≤ 29 |

Tabel 4.1: Specificații tehnice turbină cu abur [211]

Pentru a iniția calculul și a determina puterea electrică produsă având ca sursă de energie primară cele două tipuri de lemn prezentate anterior au fost aleși parametrii aburului viu astfel: temperatura (t₀) 520°C și presiunea (p₀) 100 bar. Temperatura medie anuală a apei reci a fost considerată 14°C, iar creșterea temperaturii apei de răcire în condensator (Δt_{cd}) a fost de 9°C. Diferența minimă de temperatură în condensator ($\delta t_{min cd}$) a fost aleasă din curba de sarcină, 4,5°C, astfel a rezultat temperatura de condensare (t_{cd}) de 27,5°C. Presiunea de condensare (p_{cd}) a fost determinată din tabelele de proprietăți termodinamice apă/abur în funcție de temperatura de saturație a aburului la condensator (p_{cd}(t_{cd})). În

Tabel 4.2 sunt prezentate datele inițiale considerate pentru demararea calculului circuitului termomecanic.

| Mărime/Parametru | Notație | U.M. | Plop uscat | Plop |
|------------------------------------------------|-----------------------|------|------------|-------|
| | , | | - | umed |
| Parametrii aburului viu: | | | | |
| - Presiune | \mathbf{p}_0 | bar | 10 | 00 |
| - Temperatură | t_0 | °C | 52 | 20 |
| Temperatura apei de răcire (medie anuală) | t _{râu} | °C | 14 | |
| Încălzirea apei de răcire în condensator | Δt_{cd} | °C | 9 | |
| Diferența minimă de temperatură în condensator | $\delta t_{min \ cd}$ | °C | 4 | ,5 |
| Parametrii la condensator | | | | |
| - Presiune | \mathbf{p}_{cd} | bar | 0,03 | 674 |
| - Temperatură | t _{cd} | °C | 27. | ,50 |
| Puterea termică dezvoltată prin ardere la GA | Ptc | kW | 22381 | 14295 |
| Randamentul GA | η_{GA} | % | 8 | 5 |
| Număr trepte de preîncălzire | Z | - | 6 | 5 |

Tabel 4.2: Ipoteze de calcul pentru instalația de turbină cu abur

După cum a fost menționat mai sus, primul pas în calculul circuitului termomecanic este alegerea presiunii la condensator. Următorul pas este realizarea schemei termice care presupune alegerea poziției degazorului în linia de preîncălzire regenerativă și determinarea parametrilor apei la preîncălzitoare și a presiunilor aburului la aparate și la prize. Modelarea destinderii aburului în turbină presupune calculul de modelare a conductelor de medie presiune dintre generatorul de abur și turbina cu abur și a proceselor din treptele de presiune ale CIMP și CJP.

Calculul circuitului termomecanic presupune, de asemenea calcularea lucrului mecanic specific și reprezentarea procesului din turbina cu abur în diagrama entalpie-entropie (h-s). În urma efectuării calculului circuitului termomecanic sunt determinați și indicatorii de performanță ai instalației de turbină cu abur. Schema circuitului termomecanic este prezentată în Figura 4.7.

În Figura 4.5 sunt prezentate puterea termică dezvoltată prin ardere în generatorul de abur, puterea termică intrată în ciclul de conversie, puterea internă dezvoltată în turbina cu abur, puterea mecanică la cupla turbinei, puterea la bornele generatorului și puterea electrică seminetă, determinate pentru cele două materiale utilizate, plop uscat și plop umed. În cazul utilizării materialului umed se observă o scădere a puterilor dezvoltate în instalație. Acest lucru se datorează calității mai scăzute a combustibilului umed (PCI 10,54 MJ/kg versus 16,13 MJ/kg pentru lemn uscat), întrucât debitul de combustibil este aproximativ egal, 1,36 kg/s de lemn umed și 1,39 kg/s de lemn uscat.

Conform rezultatelor obținute, un conținut de umiditate al materialului de 30%, conduce la scăderea cu circa 36% a puterii termice dezvoltate prin arderea combustibilului și la scăderea cu circa 40% a puterii electrice semi-nete produse. Puterea electrică semi-netă produsă în cazul utilizării lemnului de plop uscat este de aproximativ 7 MW, iar în cazul utilizării lemnului de plop umed este de aproximativ 4,2 MW.

Figura 4.5. Puterile dezvoltate în instalația de Figura 4.6. Randamente instalație de turbină cu abur abur

În Figura 4.6 sunt prezentate randamentul termic al ciclului, randamentul mecanic, randamentul generatorului, randamentul grupului turbogenerator semi-net, randamentul electric brut și randamentul electric semi-net, în funcție de tipul biomasei cu care este alimentată instalația. Din grafic se poate observa că randamentul mecanic și randamentul generatorului nu sunt puternic influențate de conținutul de umiditate al probei. Însă, randamentul termic al ciclului, randamentul grupului turbogenerator seminet, randamentul electric brut și randamentul grupului turbogenerator seminet, randamentul electric brut și randamentul electric seminet, scad cu aproximativ două puncte procentuale, la un conținut de umiditate de 30% al probei.

GA – generator de abur; CIMP – corp de înaltă-mediu presiune; CJP – corp de joasă presiune; GE – generator electric; Cd – condensator; PJP – preîncălzitor de joasă presiune; DEG – degazor termic; PIP – corp de înaltă presiune. Figura 4.7. Schema circuitului termomecanic

4.3. INFLUENȚA CALITĂȚII COMBUSTIBILULUI ASUPRA SISTEMULUI DE CONVERSIE ÎN ENERGIE

Conținutul de umiditate are un impact major asupra calității combustibilului, o mare parte din conținutul energetic al acestuia fiind consumat pentru uscare. Pentru a determina influența calității combustibilului asupra sistemului de conversie în energie a fost considerat debitul inițial de biomasă (cu conținut de umiditate de 30%) de 1,98 kg/s. Acesta reprezintă necesarul de biomasă umedă (cu conținut de umiditate de 30%) pentru a obține un debit de 1,39 kg/s de lemn de plop uscat, necesar alimentării reactorului de gazeificare pentru a produce Singaz 1. Pentru acest debit de biomasă (1,98 kg/s) a fost determinată puterea electrică semi netă produsă în instalația de turbină cu abur prezentată în subcapitolul anterior. Rezultatele obținute sunt comparate cu rezultatele obținute în cazul alimentării ITA cu 1,39 kg/s lemn de plop uscat, care reprezintă masa uscată a aceluiași disponibil de biomasă.

Pentru realizarea calcului au fost considerați aceiași parametrii de intrare (Tabel 4.2), însă puterea termică dezvoltată prin ardere este în acest caz 20868 kW.

turbină cu abur

Din figurile de mai sus se poate observa că utilizarea lemnului umed (conținut de umiditate de 30%), comparativ cu utilizarea masei uscate a cantității inițiale disponibile, în instalații de turbine cu abur, conduce la scăderea puterilor dezvoltate în instalație. Puterea electrică semi-netă produsă este mai mică cu aproximativ 500 kW.

4.4. SOLUȚIA DE CONVERSIE ÎN INSTALAȚIILE DE MICĂ PUTERE

În acest subcapitol a fost determinată puterea electrică seminetă produsă în instalația de turbină cu abur, echipată cu turbina cu abur model Siemens SST-060. Puterea electrică produsă a fost calculată pentru trei debite de biomasă:

- Necesarul de biomasă uscată (1,39 kg/s) pentru producerea debitului necesar alimentării cu Singaz 1 a instalației de turbină cu gaze;
- Necesarul de biomasă umedă (1,36 kg/s) pentru producerea debitului necesar alimentării cu Singaz 2 a instalației de turbină cu gaze;
- Necesarul de biomasă umedă (1,98 kg/s) pentru asigurarea unui debit de biomasă uscată de 1,39 kg/s.

Biomasa considerată a fost lemnul de plop a cărui putere calorifică inferioară este 16128 kJ/kg (material uscat).

În cazul utilizării biomasei uscate în instalația de turbină cu abur, puterea electrică seminetă este de 6953 kW, iar randamentul electric seminet este de 31,07%. În cazul utilizării unui debit de lemn de plop umed de 1,36 kg/s, puterea electrică seminetă obținută este de 4163 kW, randamentul instalației fiind în acest caz 29,12%.

În cel de-al treilea caz, debit de biomasă umedă de 1,98kg/s (masă uscată = 1,39 kg/s) se obține în ITA o putere electrică seminetă de 6547 kW, la un randament electric seminet al instalației de 30,80%.

Conform rezultatelor obținute soluția cea mai avantajoasă ar fi utilizarea debitului de biomasă umedă de 1,98 kg/s în ITA pentru producerea de energie electrică. Deși cele mai bune rezultate sunt obținute în cazul utilizării biomasei uscate, această soluție implică uscarea

completă a biomasei, însă uscarea biomasei implică un consum suplimentar de energie, care poate depăși 500 kW.

CAPITOLUL V 5. STUDIU COMPARATIV PRIVIND ANALIZA EMISIILOR POLUANTE A DIVERSELOR SOLUȚII DE VALORIFICARE A BIOMASEI

5.1. IDENTIFICAREA ȘI DETERMINAREA TIPURILOR DE POLUANȚI

Arderea biomasei are impact asupra mediului datorită emisiilor atmosferice. În funcție de tipul emisiei, influența acesteia poate să fie locală – emisii de particule sau cauzate de arderea incompletă, regională – emisiile de NO_x și SO_2 sau alte emisii cauzatoare de precipitații acide, sau globală – emisii de gaze cu efect de seră sau care au ca efect epuizarea stratului de ozon [70].

Gazul de sinteză provenit din reactorul de gazeificare conține diferiți contaminanți, precum particule, gudron, compuși ai sulfului sau clorului, care trebuie îndepărtați din gaz, pentru utilizarea acestuia, fie drept materie primă chimică, fie drept combustibil [17, 71].

Din cauza contaminanților prezenți în gazul de sinteză și a imposibilității utilizării gazului exact cum iese din reactor, uzual reactorul de gazeificare și instalațiile de curățare a gazului sunt considerate ca sistem integrat [68]. În Figura 5.1 este prezentat schematic lanțul de conversie biomasă – energie electrică, utilizând ca proces de conversie termo-chimică gazeificarea. Astfel, analizând schema de mai jos pot fi observați poluanții prezenți în singaz la ieșirea din reactorul de gazeificare: gudron, pulberi sau particule solide de dimensiuni mari, compuși derivați ai sulfului sau ai clorului și particule fine. Pentru fiecare tip de poluant fiind necesară aplicarea unei alte metode de reținere.

Figura 5.1. Lanțul de conversie biomasă energie electrică via gazeificare

Figura 5.2. Lanțul de conversie biomasă energie electrică via combustie

În Figura 5.2 este prezentat lanțul de conversie biomasă – energie electrică și măsurile de reducere a emisiilor aplicate.

Comparând figura de mai sus cu Figura 5.1 (Lanțul de conversie biomasă - energie electrică via gazeificare) putem observa că o parte din instalațiile utilizate pentru curățarea gazului de sinteză (filtru ciclon, scruber, electrofiltru/filtru cu saci), sunt utilizate și pentru reducerea emisiilor produse prin arderea biomasei [16]. Procesul de combustie se deosebește de cel de gazeificare prin oxidarea totală a elementelor combustibile conținute în materialul convertit. Ceea ce însemnă că în fluxul de gaze de ardere nu ar trebui să întâlnim gudron sau alte elemente combustibile. Din acest motiv instalațiile ce curățare a gazelor de ardere nu includ echipamente de curățare/eliminare al gudronului din fluxul de gaz.

5.2. CONCENTRAȚII DE POLUANȚI ÎN FLUXURILE DE PROCES

După cum a fost precizat și în capitolele anterioare, există o multitudine de factori care influențează procesele de conversie a biomasei. Astfel, în funcție de tipul și caracteristicile biomasei, de tipul instalației de conversie, a parametrilor de proces etc., concentrațiile de poluanți în fluxurile de proces diferă în limite foarte largi. Astfel, în funcție de proprietățile biomasei poate fi ales un tip de instalație de conversie optim, coroborat cu parametri optimi de proces, astfel încât emisiile poluante să fie minimizate.

5.3. FACTORII DE EMISIE

Factorul de emisie este un criteriu de comparație a combustibililor sau a unităților energetice din punct de vedere al emisiilor poluante.

Prin definiție, factorul de emisie reprezintă raportul dintre cantitatea de noxe emise și cantitatea de energie produsă. Acesta mai poate fi exprimat ca raportul dintre fluxul de noxe și puterea centralei [217].

În Figura 5.3 sunt prezentați factorii de emisie de dioxid de carbon raportați la energia primară ai combustibililor gazoși studiați. Conform rezultatelor prezentate în grafic există o corelație între puterea calorifică a gazului și factorul de emisie. Astfel, pe măsură ce puterea calorifică a gazului crește, scade factorul de emisie de CO₂. Factorul de emisie de CO₂ raportat la energia primară al Singaz 1, gazul cu cea mai mică putere calorifică inferioară, este de aproape șase ori mai mare decât factorul de emisie al metanului.

Datorită sursei din care a fost produs gazul de sinteză analizat (biomasă lemnoasă), emisiile de CO_2 rezultate în urma arderii singazului nu sunt considerate drept sursă de poluare. Biomasa este considerată neutră din punct de vedere al emisiilor de dioxid de carbon, întrucât se consideră că pe durata creșterii, aceasta a absorbit din atmosferă o cantitate de CO_2 echivalentă cu cea degajată în urma arderii.

Figura 5.3. Factori de emisie de CO₂ raportați la energia primară - combustibil gazos

În Figura 5.4 sunt prezentați factorii de emisie de dioxid de carbon raportați la energia primară, pentru toți combustibilii solizi studiați în această lucrare. După cum am precizat mai sus, factorii de emisie raportați la energia primară sunt o caracteristică a combustibilului, astfel combustibilii pot fi comparați între ei din punct de vedere al emisiilor.

Analizând rezultatele prezentate în grafic putem observa că în cazul lemnului de plop, creșterea conținutului de umiditate de la 0 la 30% are o influență negativă asupra emisiilor de dioxid de carbon. Factorul de emisie de CO₂ raportat la energia primară al plopului crește cu peste 7% la creșterea conținutului de umiditate al combustibilului cu 30%. În cazul tulpinilor de rapiță factorul de emisie de dioxid de carbon raportat la energia primară crește cu aproximativ 1%, și respectiv peste 2%, la creșterea conținutului de umiditate al tulpinilor cu 5%, și respectiv 10%, comparativ cu materialul uscat. Factorul de emisie de dioxid de carbon al reziduurilor de rapiță este aproximativ egal cu cel tulpinilor de rapiță uscate. Acest lucru era de așteptat, deoarece aceste două materiale reprezintă aceiași parte a plantei de rapiță, doar metoda de recoltare a fost diferită. Factorul de emisie de CO₂ raportat la energia primară al deșeului de tip food court este mai mic decât cel al lemnului, dar puțin mai mare comparativ cu cel al deșeurilor agricole.

Dintre combustibilii analizați, atât cei solizi, cât și cei gazoși, cel mai mic factor de emisie de CO₂ este cel al gazului natural. Cele mai mari emisii de dioxid de carbon sunt înregistrate pentru combustibilii gazoși de tip singaz.

În Figura 5.5 sunt prezentați factorii de emisie de dioxid de carbon raportați la energia utilă pentru cele patru instalații de turbine cu gaze analizate.

În cazul instalațiilor alimentate cu metan factorii de emisie de CO_2 sunt aproximativ egali (cca 350 g_{CO2}/kWh _{en.el.prod.}) și considerabili mai mici, comparativ cu factorii de emisie ai ITG alimentate cu singaz. În cazul utilizării Singaz 1, și respectiv Singaz 2, factorul de emisie este de aproximativ 8, și respectiv de 5 ori mai mare, comparativ cu arderea metanului în instalația de turbină cu gaze. Însă, după cum am precizat mai devreme, singazul este considerat neutru din punct de vedere al emisiilor de CO_2 , acest factor fiind calculat cu scop pur informativ.

În Figura 5.6 sunt prezentați factorii de emisie de dioxid de carbon raportați la energia utilă, în cazul utilizării lemnului de plop uscat, și respectiv cu conținut de umiditate de 30%, în instalația de turbină cu abur. Din graficul de mai sus se poate observa că în cazul utilizării lemnului de plop umed, factorul de emisie de CO₂ este mai mare cu aproximativ 14%, comparativ cu factorul de emisie de CO₂ pentru ITA alimentată cu lemn de plop uscat. Acest lucru se datorează calității mai scăzute a combustibilului umed, comparativ cu cel uscat. O parte din energia produsă în urma arderii lemnului, este consumată pentru uscarea acestuia.

5.4. SOLUȚIA OPTIMĂ DE CONVERSIE ÎN ENERGIE A BIOMASEI

În urma comparației celor două ITA alimentate cu biomasă, cu cele două ITG alimentate cu singaz se poate observa că cel mai mic factor de emisie de CO₂ raportat la energia utilă este obținut în cazul ITA alimentată cu biomasă uscată. Utilizarea instalațiilor de turbine cu gaze pentru producerea energiei electrice implică emisii mai ridicate de dioxid de carbon, comparativ cu arderea directă a biomasei. Astfel, din punct de vedere al emisiilor de dioxid de carbon, soluția optimă de producere a energiei electrice din biomasă este arderea biomasei în instalație de turbină cu abur.

6. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE DE CERCETARE

6.1. CONCLUZII GENERALE

Dependența omenirii de energie electrică trebuie corelată cu importanța diminuării poluării pentru menținerea unor condiții optime de viață pe Terra. Soluția pentru îndeplinirea celor expuse anterior este renunțarea la energia electrică bazată pe combustibili fosili și utilizarea unor surse de energie nepoluante, precum biomasa care prin varietatea formelor sub care poate fi întâlnită are un potențial energetic mondial foarte important.

În România cele mai importante surse de biomasă sunt reziduurile vegetale din agricultură și produsele forestiere, acestea însumând aproximativ 80% din potențialul energetic anual al surselor de biomasă. Potențialul energetic anual al produselor forestiere se ridică la 115.200 TJ/an, pe când cel al deșeurilor agricole vegetale se ridică la 850.000 TJ/an. Pentru valorificarea optimă a acestor resurse și maximizarea producerii de energie electrică în cicluri termodinamice de tip Rankine-Hirn sau de tip Brayton trebuie studiate în detaliu toate variabilele care afectează procesele conversie și efectul acestora asupra produșilor de reacție obținuți. Instalațiile actuale de combustie și gazeificare a biomasei au la bază tehnologiile de conversie a combustibililor solizi. Un singur tip de instalație de ardere/gazeificare nu poate fi dezvoltat la orice scară, există un interval de putere caracteristic fiecărui tip de instalație.

În urma analizei rezultatelor obținute experimental au fost stabiliți parametrii optimi de proces pentru fiecare material și influenta parametrilor de proces asupra calității gazului primar produs. Pentru lemnul de plop concentratiile de monoxid de carbon si hidrogen în gazul produs se maximizează la ER = 0.30 și temperatura procesului de 850°C. Calitatea gazului produs este influențată în mare parte de tipul agentului oxidant, astfel parametrii optimi de proces rezultați pentru tulpinile de rapiță sunt agent oxidant abur (SBR 0,416:1) și temperatura procesului 850°C. În cazul deseului de tip food court au rezultat două seturi de parametrii optimi de proces astfel: dacă se dorește maximizarea producției de monoxid de carbon în gazul produs parametrii optimi sunt agent de gazeificare aer, ER = 0,25 și temperatura procesului 850°C; dacă se dorește maximizarea concentrației de hidrogen în gazul produs parametrii optimi sunt agent de gazeificare aburul (SBR = 0,634:1) și temperatura procesului 850°C. Gazul primar obtinut în urma procesului de gazeificare (regim tranzitoriu) cu abur a tulpinilor de rapită la 850°C prezintă cele mai bune proprietăți, concentrațiile instantanee maxime de CO și H₂ înregistrate fiind de 12,90%, și respectiv peste 10%. Creșterea temperaturii procesului are o influență pozitivă asupra formării speciilor gazoase, indiferent de materialul utilizat, însă cantitatea de agent oxidant introdus în proces trebuie optimizată, întrucât creșterea acesteia prea mult conduce la creșterea concentrației de dioxid de carbon în gazul produs.

Pentru experimentele efectuate de gazeificare în regim discontinuu au fost calculate și eficiențele de conversie și randamentele energetice. Experimentele efectuate nu simulează un

proces complet de gazeificare, astfel că valorile eficienței de conversie a carbonului și a randamentelor energetice a proceselor fără/cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut nu reflectă valorile reale ale unui proces real de gazeificare. Cu toate acestea, valorile obținute ajută la caracterizarea proceselor, la stabilirea parametrilor optimi de proces și la observarea influenței parametrilor de proces. Cea mai mare eficiență de conversie a carbonului a fost obținută pentru procesul de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță uscate, ER = 0,30 și 850°C, aceasta fiind de 98,20/89,53% în funcție de metoda de calcul aleasă pentru determinarea cantității de gaz produs. Cea mai mare valoare a randamentului energetic fără recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut (21,35%) a fost obținută pentru procesul de gazeificare cu aer a deșeului de tip food court la ER = 0,40 și 850°C. Cea mai mare valoare a randamentului energetic cu recuperarea căldurii sensibile a gazului obținut (45,20%) a fost obținută pentru procesul de gazeificare cu aer a tulpinilor de rapiță la ER = 0,30 și 850°C. Utilizarea aburului ca agent oxidant are efect negativ asupra eficiențelor procesului întrucât acesta este mai puțin reactiv decât aerul (oxigenul). Pentru a crește randamentele proceselor de gazeificare cu aer.

Pentru a observa efectele utilizării singazului în instalații de turbine cu gaze asupra performantelor acesteia au fost alese două tipuri de singaz, (Singaz 1 și Singaz 2). Singaz 1 (obținut în urma gazeificării lemnului de plop uscat) are o putere calorifică de 4022,20 kJ/kg, iar Singaz 2 (obținut în urma gazeificării lemnului de plop umed M=30%) are o putere calorifică de 4852,10 kJ/kg. Ambele gaze au puteri calorifice considerabil mai mici decât cea a gazului natural. Utilizarea singazului în ITG, comparativ cu utilizarea metanului, conduce la creșterea consumului specific de combustibil și implicit a consumului compresorului de gaz de până la 13 ori. Creșterea consumului compresorului de gaz se resimte prin scăderea randamentului electric net cu până la 25% și a puterii electrice nete produse cu 14%. În cazul utilizării Singaz 1 în ITG, randamentul electric net este 28,30%, iar puterea electrică netă produsă este de 3902 kW. În cazul utilizării Singaz 2 randamentul electric net este de 29,29%, iar puterea electrică produsă crește usor la 3928 kW. Utilizarea singazului pentru producerea energiei electrice în instalația de turbină cu gaze are efect negativ asupra performanțelor acesteia și a producției de energie electrică, comparativ cu utilizarea gazului metan. Cu toate acestea, singazul prezintă avantajul că este o sursă de energie nepoluantă, deoarece a fost produs în urma gazeificării biomasei lemnoase. Soluția optimă în ceea ce privește alimentarea cu energie este Singaz 2, întrucât productia de energie este mai mare, iar gazul este obtinut în urma procesului de gazeificare a lemnului de plop umed, astfel nu este necesar consumul de energie pentru uscarea biomasei.

Biomasa utilizată pentru producerea Singaz 1 (1,39 kg/s lemn de plop uscat) și Singaz 2 (1,36 kg/s lemn de plop umed, M=30%) poate fi valorificată energetic în instalații de turbine cu abur. Schema circuitului termic este prevăzută cu șase trepte de preîncălzire regenerativă în vederea optimizării procesului și a creșterii randamentului instalației. Cele șase trepte de preîncălzire regenerativă sunt după cum urmează: patru preîncălzitoare de joasă presiune, un degazor termic și un preîncălzitor de înaltă presiune. Pentru a determina puterea electrică produsă în ITA în funcție de disponibilul de biomasă, a fost efectuat calculul circuitului termomecanic. Astfel, puterea electrică semi netă produsă în ITA alimentată cu plop uscat este de 6953 kW, randamentul electric semi net fiind de 31,07%. În cazul ITA alimentată cu lemn de plop umed puterea electrică semi netă produsă este de 4163 kW, iar randamentul electric semi net este de 29,12%.

Pentru a putea observa influența calității combustibilului asupra performanțelor instalației a fost estimată și puterea electrică produsă în ITA alimentată cu 1,98 kg/s lemn de plop cu umiditate de 30% (acesta reprezentând necesarul de biomasă umedă pentru obținerea a 1,39 kg/s lemn de plop uscat). Puterea electrică semi netă produsă în ITA în acest caz a fost de 6428 kW, la un randament electric semi net al instalației de 30,80%. Astfel, uscarea biomasei

conduce la creșterea puterii electrice produse doar cu 525 kW și la creșterea randamentului cu 0,27 puncte procentuale. Aceste creșteri ale puterii și randamentului sunt nesemnificative, comparativ cu consumul de energie necesar uscării biomasei.

Chiar dacă biomasa este considerată o sursă regenerabilă de energie, o sursă nepoluantă, în urma conversiei termo-chimice a acesteia apar poluanții în fluxurile de proces. Tipurile de poluanți prezente în cele două procese studiate, combustia și gazeificarea, au fost identificați, fiind prezentate și tehnologiile de curățare a gazelor pentru fiecare proces.

Chiar dacă soluțiile de producere a energie electrice propuse în această lucrare sunt considerate neutre din punct de vedere al emisiilor de dioxid de carbon, asta nu înseamnă că acestea nu trebuie considerate. Astfel că, au fost calculați factorii de emisie de dioxid de carbon raportați la energia primară, pentru fiecare tip de combustibil studiat, și factorii de emisie de dioxid de carbon raportați la energia utilă pentru fiecare instalație de producere a energiei electrice prezentată. În ceea ce privește combustibilii studiați, cel mai mici emisii de dioxid de carbon sunt înregistrate pentru reziduurile de rapiță (306,00 gco2/kWhtermic dezvoltat prin arderea cb), cele mai mari emisii fiind cele ale Singaz 1 (774, 87 gco2/kWhtermic dezvoltat prin arderea cb). Factorul de emisie raportat la energia utilă pentru instalațiile de turbine cu gaze alimentate cu singaz este aproximativ dublu, comparativ cu ITA alimentată cu biomasă solidă. Cele mai mici emisii de CO₂ sunt înregistrate pentru ITA alimentată cu lemn de plop uscat, 1146,77 gco2/kWh_{en-el-produsă}.

6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE

Studiul bibliografic s-a concretizat printr-o analiză a tuturor variabilelor care influențează procesele de conversie, a efectelor acestora asupra proceselor și a produșilor de reacție, și printr-o analiză comparativă detaliată a tipurilor de reactoare de gazeificare a biomasei existente.

În ceea ce privește partea experimentală, această lucrare acorda o importanta particulara studiului regimurilor tranzitorii ale proceselor de gazeificare. Cu ajutorul acestora, etapele procesului de gazeificare pot fi delimitate în timp, astfel putând fi cuantificate speciile gazoase produse în fiecare moment a procesului. Deși nu poate fi determinată compoziția gazului de sinteză pentru un regim de funcționare continua, prin această abordare este relevat stadiul inițial al proceselor de gazeificare ce servește drept punct de plecare pentru obținerea parametrilor optimi de proces necesari inițierii procesului de gazeificare a unui anumit tip de material precum și instabilitățile procesului pe perioadele de funcționare la sarcini parțiale (modificări în funcționarea continuă). De asemenea, regimul tranzitoriu al unui proces de gazeificare oferă toate datele necesare calculării bilanțurilor masice și energetice și a eficiențelor procesului. Astfel, poate fi urmărită influența parametrilor de proces, asupra performanțelor energetice ale procesului.

Conform literaturii de specialitate, tulpinile de rapiță și deșeul de tip food court nu au mai fost utilizate până acum drept materie primă în procesele de gazeificare. Această teză furnizează date experimentale pentru conversia acestor produși. În urma analizei rezultatelor experimentale, aceste două materiale studiate prezintă proprietăți mai bune, comparativ cu cele ale lemnului de plop, putând fi astfel luate în considerare ca o sursă primară de energie pentru procesele de gazeificare.

În Capitolul III s-a studiat efectul utilizării gazelor produse prin gazeificarea biomasei asupra performanțelor instalațiilor de turbine cu gaze (studiu de caz – ITG de tip Solar Mercury 50).

De asemenea, s-a utilizat ca referință pentru compararea puterilor electrice posibil a fi produse prin utilizarea biomasei o instalație de turbină cu abur pentru care s-a estimat puterea electrică produsă în funcție de disponibilitatea sursei de biomasă.

6.3. PERSPECTIVE DE CERCETARE

Întrucât omenirea este dependentă de energia electrică, iar schimbările climatice impun reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, este imperios găsirea unor noi surse primare de energie și optimizarea proceselor de conversie în energie a biomasei. Din aceste motive, principalele perspective de cercetare care trebuie studiate ulterior sunt:

 Studiul gazeificării altor tipuri de amestecuri de produse. Sursele de biomasă sunt de regulă caracterizate de un debit discontinuu, spre exemplu reziduurile agricole vegetale. De regulă acestea sunt produse o singură dată pe an și în diferite regiuni ale țării. Pentru a dispune de o cantitate cât mai mare și a asigura o continuitate în alimentare a instalațiilor, acestea trebuie colectate și depozitate într-un singur loc. Utilizarea acestora în amestecuri cu alte deșeuri sau cu produse forestiere ar putea face posibilă utilizarea lor în mai multe locații.
 Efectul modificării rețetei deșeului de tip food court asupra performanțelor procesului de gazeificare. După cum am precizat în paragraful 3.1.1.6, rețeta deșeului de tip food court variază inclusiv în cadrul aceleiași locații în funcție de oră. Rezultatele obținute în această lucrare sunt strict valabile pentru o rețetă de deșeu, rețetă pe care este posibil să nu o mai găsim în funcție de locul în care este generat deșeul. Din acest motiv consider că este interesant de urmărit efectul rețetei deșeului asupra compoziției gazului produs.

3. Crearea unui scheme logice pentru alegerea tipului reactorului de gazeificare optim în funcție de proprietățile și disponibilitatea sursei de biomasă, pentru a maximiza puterea electrică produsă. În Capitolul II au fost prezentate efectele variabilelor care influențează procesul de gazeificare și analiza comparativă a reactoarelor de gazeificare. Astfel, pentru a maximiza efectul util al disponibilului de biomasă trebuie să fie ales reactorul optim de conversie și parametrii optimi de proces.

BIBLIOGRAFIE

[1]. Pedraza, Jorge Morales. *Electrical energy generation in Europe: the current and future role of conventional energy sources in the regional generation of electricity*. Springer, 2014.

[2]. IndexMundi - Country Facts - https://www.indexmundi.com/, accesat 05.03.2019, 12:00

[3]. World Bank Open Data - https://data.worldbank.org/, accesat 05.03.2019, 12:00

[4]. EUROSTAT <u>https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Main_Page</u>, accesat 25.06.2018, 18:24

[5]. Smith, Elliott C., et al. *East European energy. Romania's energy needs persist*. No. GAO/NSIAD--92-257. General Accounting Office, 1992.

[9]. Miller, Bruce G., and David Tillman. *Combustion engineering issues for solid fuel systems*. Academic Press, 2008

[10]. Juntunen, Jouni K., and Sampsa Hyysalo. "Renewable micro-generation of heat and electricity— Review on common and missing socio-technical configurations." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015): 857-870.

[11]. Kelly, Nick, et al. "Impact of microgeneration systems on the low-voltage electricity grid." (2014).

[14]. Badea, Adrian Alexandru, Victor Cenușă, and Mihaela-Cristina Ciobanu. *Surse regenerabile de energie*. AGIR, 2013.

[15]. Beneficiile energiei regenerabile, Comisia Europeana, 2011 – EC2011

[16]. De Jong, Wiebren, and J. Ruud van Ommen. *Biomass as a sustainable energy source for the future: Fundamentals of conversion processes.* John Wiley & Sons, 2014.

[17]. Higman, and M. van der Burgt, Gasification, Gulf Professional Publishing, 2008

[18]. Demirbas, M. Fatih, Mustafa Balat, and Havva Balat. "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development." *Energy Conversion and Management* 50.7 (2009): 1746-1760.

[19]. Basu, Prabir. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory.* Academic press, 2013.

[23]. Heidenreich, Steffen, Michael Müller, and Pier Ugo Foscolo. *Advanced biomass gasification: New concepts for efficiency increase and product flexibility*. Academic Press, 2016.

[35]. CEONU pentru Europa, Comisia Economică ONU, and Ministerul Ecologiei și resurselor Naturale. "Raport informativ privind politicile naționale în domeniul eficienței energetice și surselor regenerabile de energie.", Iunie 2009

[41]. Schwietzke, Stefan, et al. "Ethanol production from maize." *Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. 347-364.;

[42]. Oleskowicz-Popiel, Piotr, et al. "Ethanol production from maize silage as lignocellulosic biomass in anaerobically digested and wet-oxidized manure." *Bioresource technology* 99.13 (2008): 5327-5334.;

[43]. Vučurović, Damjan G., et al. "Process model and economic analysis of ethanol production from sugar beet raw juice as part of the cleaner production concept." *Bioresource technology* 104 (2012): 367-372.;

[44]. İçöz, Erkan, et al. "Research on ethanol production and use from sugar beet in Turkey." *Biomass and bioenergy* 33.1 (2009): 1-7.

[45]. Saka, Shiro, and Dadan Kusdiana. "Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol." *Fuel* 80.2 (2001): 225-231.;

[46]. Rashid, Umer, and Farooq Anwar. "Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil." *Fuel* 87.3 (2008): 265-273.

[52]. Smets, Koen, et al. "Flash pyrolysis of rapeseed cake: influence of temperature on the yield and the characteristics of the pyrolysis liquid." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 90.2 (2011): 118-125.

[53]. Ucar, Suat, and Ahmet R. Ozkan. "Characterization of products from the pyrolysis of rapeseed oil cake." *Bioresource technology* 99.18 (2008): 8771-8776.

[62]. Cornelissen, Tom, et al. "Flash co-pyrolysis of biomass: The influence of biopolymers." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 85.1 (2009): 87-97.,

[63]. Stolarski, Mariusz Jerzy, et al. "Willow biomass as a feedstock for gasification." *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 58.1 (2013): 168-171,

[64]. Martin, J. R., et al. "Recent results of willow biomass gasification feasibility study." *First international energy conversion engineering conference, Providence, RI.* 2004

[66]. Crocker, Mark, ed. *Thermochemical conversion of biomass to liquid fuels and chemicals*. No. 1. Royal Society of Chemistry, 2010.

[67]. Stevens, Christian. *Thermochemical processing of biomass: conversion into fuels, chemicals and power*. Ed. Robert C. Brown. John Wiley & Sons, 2011.

[68]. Cheremisinoff, Nicholas P., and John Rezaiyan. *Gasification technologies: a primer for engineers and scientists*. CRC press, 2005.

[69]. Spliethoff, Hartmut, Power generation from solid fuels. Springer Science & Business Media, 2010

[70]. Koppejan, Jaap, and Sjaak Van Loo. The handbook of biomass combustion and co-firing. Routledge, 2012

[71]. Basu, Prabir. Combustion and gasification in fluidized beds. CRC press, 2006.

[82]. Branca, Carmen, et al. "Effects of the torrefaction conditions on the fixed-bed pyrolysis of Norway spruce." *Energy & Fuels* 28.9 (2014): 5882-5891.

[93]. De Wild, P. J., W. J. J. Huijgen, and H. J. Heeres. "Pyrolysis of wheat straw-derived organosolv lignin." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 93 (2012): 95-103.

[94]. DeGroot, William F., and Fred Shafizadeh. "Kinetics of gasification of Douglas Fir and Cottonwood chars by carbon dioxide." *Fuel* 63.2 (1984): 210-216.

[95]. Delgado, Raúl, et al. "Energy valorisation of crude glycerol and corn straw by means of slow copyrolysis: production and characterisation of gas, char and bio-oil." *Fuel* 112 (2013): 31-37.

[96]. Demirbas, Ayhan. "Combustion characteristics of different biomass fuels." *Progress in energy and combustion science* 30.2 (2004): 219-230.

[97]. Demirbas, Ayhan. "Pyrolysis of ground beech wood in irregular heating rate conditions." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 73.1 (2005): 39-43.

[98]. Demirbas, M. F. "Characterization of bio-oils from spruce wood (Picea orientalis L.) via pyrolysis." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 32.10 (2010): 909-916.

[99]. Desideri, U., Gh Lazaroiu, and C. Stroe. "Conventional pyrolysis of spruce wood and hazelnut shell delivering oily products." *Journal of sustainable energy*2.2 (2011): 55-58.

[100]. Ebeling, J. M., and B. M. Jenkins. "Physical and chemical properties of biomass fuels." *Transactions of the ASAE* 28.3 (1985): 898-0902.

[112]. Jablonski, Whitney, et al. "Pilot-scale gasification of corn stover, switchgrass, wheat straw, and wood: 2. Identification of global chemistry using multivariate curve resolution techniques." *Industrial & Engineering Chemistry Research*48.23 (2009): 10691-10701.

[114]. Karaosmanoğlu, F., E. Tetik, and E. Göllü. "Biofuel production using slow pyrolysis of the straw and stalk of the rapeseed plant." *Fuel processing technology* 59.1 (1999): 1-12.

[123]. Mani, Thilakavathi, et al. "Pyrolysis of wheat straw in a thermogravimetric analyzer: effect of particle size and heating rate on devolatilization and estimation of global kinetics." *Chemical Engineering Research and Design* 88.8 (2010): 952-958.

[124]. Moilanen, Antero, and Muhammad Nasrullah. *Gasification reactivity and ash sintering behaviour of biomass feedstocks*. Kopijyvä Oy, 2011.

[125]. Moralı, Uğur, and Sevgi Şensöz. "Pyrolysis of hornbeam shell (Carpinus betulus L.) in a fixed bed reactor: Characterization of bio-oil and bio-char." *Fuel*150 (2015): 672-678.

[129]. Nakanishi, Masakazu, Tomoko Ogi, and Yoshio Fukuda. "Thermogravimetric analysis with gas chromatograph mass spectrometry of Japanese fir wood (Abies sachalinensis) in helium with or without steam–oxygen." *Journal of thermal analysis and calorimetry* 111.1 (2013): 929-937.

[144]. Salik, Khwaja Muhammad. "Torrefaction and gasification of biomass Experimental and simulation studies." (2016).

[145]. Salimi, Mohammad, et al. "Hydrothermal gasification of different agricultural wastes in supercritical water media for hydrogen production: a comparative study." *International Journal of Industrial Chemistry* 7.3 (2016): 277-285.

[146]. Schröder, Elisabeth. "Experiments on the pyrolysis of large beechwood particles in fixed beds." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 71.2 (2004): 669-694.

[147]. Sevilla, Marta, Juan Antonio Macia-Agullo, and Antonio B. Fuertes. "Hydrothermal carbonization of biomass as a route for the sequestration of CO 2: chemical and structural properties of the carbonized products." *biomass and bioenergy* 35.7 (2011): 3152-3159.

[148]. Sharma, Tejasvi. "Gasification and combustion of corn kernels in a pilot scale system." (2015).

[149]. Sircar, Indraneel, Anup Sane, and Jay Gore. "A Study of High-Pressure CO2 Recycling Using Pinewood Char Gasification." *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2013.

[150]. Sircar, Indraneel, et al. "A study of high pressure pinewood char gasification with CO 2." *Fuel* 134 (2014): 554-564.

[151]. Sonobe, Taro, Nakorn Worasuwannarak, and Suneerat Pipatmanomai. "Synergies in co-pyrolysis of Thai lignite and corncob." *Fuel Processing Technology* 89.12 (2008): 1371-1378.

[168]. Klašnja, Bojana, Saša Orlović, and Zoran Galić. "Comparison of different wood species as raw materials for bioenergy." *SEEFOR (South-east European forestry)* 4.2 (2013): 81-88.

[169]. Ozturk, H. Huseyin, and Ali Bascetincelik. "Energy exploitation of agricultural biomass potential in Turkey." *Energy exploration & exploitation* 24.4 (2006): 313-330.

[177]. Nussbaumer, Thomas. "Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction." *Energy & fuels* 17.6 (2003): 1510-1521.

[179]. Luque, Rafael, and J. Speight, eds. *Gasification for Synthetic Fuel Production: Fundamentals, Processes and Applications*. Elsevier, 2014.

[180]. Speight, James G. Gasification of unconventional feedstocks. Gulf Professional Publishing, 2014.

[187]. Baratieri, M., et al. "The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: a comparative analysis." *Applied Thermal Engineering* 29.16 (2009): 3309-3318.

[188]. Proiect BIONov-PyroTECH – Producția de BIOcombustibili prin metode iNOVatoare de PIROliză /gazeificare și TEHnologii avansate - Un Program Dedicat Recrutării și Formării Tinerilor Cercetători Români în Domeniul Energiei și Produselor din Biomasă

[189]. López-Linares, Juan Carlos, et al. "Bioethanol production from rapeseed straw at high solids loading with different process configurations." *Fuel* 122 (2014): 112-118.

[190]. Plis, P., and R. K. Wilk. "Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier." *Energy* 36.6 (2011): 3838-3845.

[191]. Deng, Jian, et al. "Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 86.2 (2009): 331-337.

[215]. Johansson, Linda S. Characterisation of particle emissions from small-scale biomass combustion. Diss. Chalmers tekniska högsk., 2002.

[216]. Moroń, Wojciech, and Wiesław Rybak. "NOx and SO2 emissions of coals, biomass and their blends under different oxy-fuel atmospheres." *Atmospheric Environment* 116 (2015): 65-71.

[217]. Marculescu C., Procese antropice si impact generat asupra mediului,ISBN 978-606-8371-1 l-5,Editura Academiei Oamenilor de Stiinta din Romania, Bucuresti, 201 1, 84 p.