

REZUMAT

Lucrarea de doctorat reprezintă un ansamblu de realizări teoretice și practice asupra proceselor de valorificare energetică a biomasei vegetale prin tehnologia gazeificării.

Gazeificarea a fost studiată până la limita realizărilor industriale, inițial pentru cărbune și ulterior pentru biomasă lemnoasă. Aplicarea tehnologiei la biomasa vegetală (de origine agricolă) se află într-o fază de inițiere, cu realizări la scară de laborator, sau de pilot, pentru puteri termice reduse.

Cercetările mondiale asupra gazeificării biomasei vegetale nu au parcurs decât faza alegerii tehnologiei agreate din punctul de vedere tehnic în corelație cu caracteristicile energetice ale combustibilului primar. Unanim, se acceptă pentru faza actuală tehnologia gazeificării în strat fix, cu curgere descendentă, sau altfel formulată cu curgere în echicurent.

Cercetările referitoare la gazeificarea biomasei vegetale vor trebui să parcurgă tot ciclul legat de procesele specifice termo-chimice dezvoltate anterior pentru cărbune și lemn. Se pune problematica câmpului de temperaturi din zonele de uscare și devolatilizare a biomasei vegetale și mai ales pentru patul de jar. De regulă biomasa vegetală are un conținut semnificativ de umiditate, dar în special un conținut ridicat de volatile (emisia de H_2 și CH_4 din volatile va influența pozitiv conținutul de elemente combustibile din gazul de gazogen produs). Referitor la patul de jar, în funcție de caracteristicile energetice ale biomasei vegetale se ridică problema realizării unei temperaturi prin combustia parțială a carbonului fix controlată prin excesul de aer care să controleze în final conversia CO_2 în CO . În paralel apare și conversia pentru formarea componentelor gazoase combustibile H_2 și CH_4 .

Modelul analitic dezvoltat răspunde la aceste aspecte impuse de caracteristicile biomasei vegetale. Modelul dezvoltat cuprinde gazeificare autotermă (fără contribuție de căldură din exterior) pentru un sistem de gazeificare cu pat fix și curgere descendentă.

Modelul analitic de calcul a fost validat prin experimentări pe o instalație de gazeificare special construită. Instalația cuprinde un gazogen cu pat fix și curgere verticală (tip Lurgi), instalație dotată cu senzor de temperatură amplasat în strat și cu analizor de gaze de ardere pentru probe preluate din gazul de gazogen evacuat.

Lucrarea cuprinde 7 capitole, din care ultimul reprezintă concluziile generale, contribuțiile realizate și perspectivele pentru viitor.

Parcursul capitolelor lucrării duce la următoarele aspecte asupra realizărilor din lucrare:

Capitolul 1

Intitulat "Bazele procesului de gazeificare" face o prezentare sintetică a proceselor parcurse de combustibilul primar în reactorul de gazeificare, principial prezentat în figura 1.1. Pentru un gazogen cu strat fix și curgere descendentă s-au poziționat principalele procese, ce cuprind uscarea, piroliza, combustia și reducerea componentelor gazoase în stratul de carbon încins. Aceste procese, există și se dezvoltă la toate tipurile de gazogene, prezentate în tabelul 1.1., cu referire la circulația combustibil-oxidant și la nivelul de temperatură necesar.

S-au prezentat componentele gazoase emise în faza de piroliză, precum și influența reacțiilor de reducere din patul fix. S-au făcut referiri și la gudronul rezultat ca un produs secundar cu efecte total negative.

În capitol s-au făcut referiri bibliografice și la oxidarea cu oxigen și la efectul aburului ca principii tehnologice pentru o anumită clasă de gazogene și combustibili primari. Datele din figura 1.2. fac legătura dintre natura combustibililor și tehnologiilor de gazeificare la nivelul de aplicații tehnologice industriale.

Capitolul cuprinde și realizări semnificative de instalații de gazeificare din Uniunea Europeană, cu precizarea combustibililor primari utilizați, a tehnologiei de gazeificare și a utilizării energetice a gazului de gazogen produs.

Capitolul 3 tratează ”modelarea numerică a proceselor de gazeificare”. Această abordare a apărut necesară pentru compararea și transpunerea datelor obținute pe o lungă funcționare cu cărbune, la combustibilii primari regenerabili. Pentru început s-a realizat o trecere în revistă a principalelor realizări de modelare a proceselor de gazeificare. Urmează o clasificare a modelelor de simulare numerică, clasificate în modele zerodimensionale, unidimensionale, bidimensionale și tridimensionale, având la bază principiul echilibrului termodinamic.

S-a evidențiat importanța regimului de combustie, care poate fi stoichiometric sau substoichiometric, precum și a factorului energiei totale Gibbs. În tabelul 2.3 s-a prezentat o sinteză a principiilor de modelare stoichiometrică, urmată de precizări privind trecerea spre modelele nestoichiometrice. Tabelul 3.3. cuprinde o sistematizare a rezultatelor diverselor metode de simulare numerică, pentru toate tehnologiile de gazeificare.

Capitolul se încheie cu o prezentare detaliată a modelelor de echilibru termodinamic TEM, modele considerate relativ simple de aplicat. Modelele respective sunt caracterizate de un nivel corespunzător de simplitate, fiind foarte flexibile la calitatea combustibilului primar. Structura modelelor este prezentată în figura 3.1. și cuprinde trei unități, respectiv uscare, piroliză și gazeificare.

Modelul conține un set complet de relații de calcul determinate experimental pentru unitățile de piroliză și gazeificare, în funcție de temperatura din unitatea respectivă, inclusiv pentru reacția de reformare abur și reformare metan-abur din patul de jar.

Aceste modele au permis dezvoltarea de aplicații ulterioare, cu evidențierea influenței excesului de aer, a preîncălzirii aerului, a injecției de abur sau de îmbogățirea a aerului cu oxigen.

În figura 3.3. se prezintă o sinteză a influenței excesului de aer asupra compoziției gazului de gazogen, și deci și asupra puterii calorifice a acestuia.

În încheierea capitolului pentru dezvoltarea obiectivelor tezei de doctorat, se precizează că pornind de la datele prezentate pentru gazeificarea biomasei vegetale se preconizează dezvoltarea teoretică și experimentală a unei instalații simple, aplicabilă ușor în agricultură, cu gazeificarea autotermă cu aer cu pat fix și curgere descendentă.

Capitolul 4, Modelarea procesului unui gazogen de putere redusă cu strat fix pentru biomasă, cuprinde datele ce au condus la dezvoltarea unui model analitic original de calcul, model validat în final prin valorile obținute pentru biomasa vegetală.

În partea inițială, în subcapitolul 4.1. se prezintă biomasa produsă în România, din punct de vedere al caracteristicilor energetice determinate pentru procesul de gazeificare.

Baza de definire a caracteristicilor energetice ale combustibililor primari a fost acordată analizei tehnice ce cuprinde umiditatea, volatilele, carbonul fix și cenușa. Prin conținutul de volatile și de carbon fix se determină procesele din zona de piroliză, când apar componentele gazoase CO , CO_2 , H_2 și CH_4 și respectiv combustia cu creșterea temperaturii în stratul fix și reducerea și reformarea pentru formarea componentelor finale ale gazului de gazogen.

S-au prezentat caracteristicile energetice ale biomasei vegetale reprezentată prin deșeurile agricole (paiele de cereale, tulpinile de porumb și floarea soarelui, cocenii) și prin deșeurile reprezentate de corzile de vie, ramuri de măr, etc.. aceste caracteristici au fost comparate cu cele ale lemnului culturilor agricole lemnoase (salcia energetică) și chiar ale cărbunilor, combustibil cu multe aplicații anterior asupra gazeificării.

S-a luat în considerare și pretratarea biomasei, ce conduce la creșterea performanțelor energetice și anume:

- Obținerea unor dimensiuni optime pentru combustibilul primar;
- Densificarea biomasei
- Creșterea puterii calorifice

Pentru atingerea acestor obiective apar operațiunile:

- Tocare și sortare
- Presarea la cald a biomasei tocate la o anumită dimensiune
- Uscarea forțată a biomasei

S-a prezentat și cantitatea posibilă de utilizare de biomasă vegetală, care reprezintă o aplicație certă pentru viitor.

Subcapitolul 4.2. cuprinde prezentarea modelului analitic original dezvoltat de autor și aplicat cu succes în continuarea lucrării de doctorat. În figura 4.2. se prezintă zonele procesului de gazeificare în cadrul modelului realizat, cu precizarea ca originalitate distribuția uniformă a aerului pe lungimea zonei de combustie.

Modelul analitic de calcul dezvoltat este particular unui gazogen cu pat fix și curgere descendentă, fără utilizarea de agent de oxidare auxiliar (abur sau/și oxigen). Modelul face parte din categoria celor pe bază de termoechilibru, gazeificarea fiind autotermă.

Procesul calculului analitic pornește de la masa anhidră obținută prin uscarea (deshidratarea) din prima fază. Urmează piroliza unde relațiile de degajare a volatilelor (CO , CO_2 , H_2 , CH_4) depinde de temperatură. Căldura pentru uscare și piroliză este obținută prin combustia carbonului fix. O dată cu aerul apare un gaz nou, și anume azotul care devine dominant.

Căldura degajată prin combustie va fi controlată prin excesul de aer λ , prin două căi, și anume:

- Temperatura din zona de piroliză
- Temperatura din stratul fix, denumită în lucrare drept ”temperatura de referință”

Excesul de aer în literatura de specialitate la gazeificarea biomasei are valori recomandate în domeniul $\lambda = 0.25 \div 0.45$.

Prin temperatura de referință se controlează procesele chimice finale, și anume conversia CO_2 în CO prin reacția de reducere (reacția Bondouard) precum și reformarea cu producția de H_2 și CH_4 . Se pot determina astfel componentele gazului de gazogen, masa acestora pornind de la masa inițială a combustibilului și puterea calorifică a gazului de gazogen (randamentul gazeificării devine un element ușor de calculat). Modelul de calcul analitic a fost validat printr-o aplicație numerică pentru biomasă lemnoasă, pentru o valoare a excesului de aer, în domeniul $\lambda = 0.4 \div 0.6$. În tabelul 4.8. se prezintă rezultatele calculului, evidențiindu-se variația componentelor gazoase finale. S-a remarcat o ușoară scădere a componentelor H_2 și CH_4 din gazul de gazogen o dată cu creșterea excesului de aer, și bineînțeles creșterea proporției de N_2 . Puterea calorifică a variat în domeniul $8000 - 7000 \text{ kJ}/m_N^3$ (valoarea mai redusă fiind la excesul de aer maxim – figura 4.9.)

Trecerea la calcularea gazeificării biomasei vegetale (agricole) pentru control, a impus apelarea la date din literatura de specialitate. Graficul din figurile 4.11 – 4.13 sintetizează calitatea gazului de gazogen în funcție de temperatura de operare (temperatura stratului fix). Valorile respective vor reprezenta încă un criteriu de validare a modelului analitic original de calcul, pentru domeniul combustibilului primar din categoria biomasei agricole (vegetale). Gazeificarea biomasei vegetale a cuprins trei domenii de calitate a biomasei vegetale:

- Domeniul I, caracterizat prin $C_f = 10\%$ și $V = 65\%$.
- Domeniul II, caracterizat prin $C_f = 15\%$ și $V = 60\%$.
- Domeniul III, caracterizat prin $C_f = 20\%$ și $V = 65\%$.

Se constată considerarea compoziției biomasei vegetale cu un conținut foarte ridicat de volatili ($V = 60 - 65\%$) și cu un conținut redus de carbon fix ($C_f = 10 - 20\%$). Se acoperă astfel calitatea biomasei vegetale reprezentată de paie de cereale, de tulpinile de porumb și floarea soarelui și respectiv de cozile de vie, cojile de floarea soarelui sau coji de nucă.

Excesul de aer a avut valorile impuse de autotermia procesului, pentru a se asigura căldura pentru uscare și piroliză (devolatilizare) și temperatura de operare a stratului fix, cu valori optime de $800 - 950^\circ\text{C}$. A rezultat necesitatea reducerii excesului de aer la creșterea valorii carbonului fix de la valorile $\lambda = 0.4 \div 0.5$ pentru $C_f = 10\%$, la $\lambda = 0.2 \div 0.3$ pentru $C_f = 20\%$.

Puterea calorifică a crescut de la o valoare în jur de $3500 \text{ kJ}/m_N^3$ la o valoare în jur de $8800 \text{ kJ}/m_N^3$ o dată cu creșterea carbonului fix în limitele de calcul.

Rezultatele obținute sunt validate de către datele din literatura de specialitate prezentate anterior. În concluzie, gazeificarea biomasei vegetale permite funcționarea eficientă pentru o operare strictă, în special pentru excesul de aer. Controlul strict al excesului de aer a permis și obținerea unui gaz de gazogen cu conținut relativ ridicat de H_2 și CH_4 , de unde a rezultat o putere calorifică la valori ridicate.

Capitolul 5 abordează ”Rezultatele experimentale ale gazeificării biomasei vegetale la instalația pilot cu strat fix”

Capitolul cuprinde în prima parte o sinteză a rezultatelor experimentale din Uniunea Europeană privitoare la gazeificarea biomasei vegetale. Cercetările sunt însă încă într-o fază incipientă, la nivelul instalației pilot, chiar și pentru un combustibil primar format din amestec de lemn și biomasă vegetală. S-au prezentat rezultate obținute experimental, inclusiv pentru un amestec de dejecții aviare cu biomasă lemnoasă în anumite proporții. Rezultatele au demonstrat obținerea unui gaz de putere calorică scăzută și randamente în domeniul 72 – 77%. Nu s-au remarcat decât cantități reduse de gudron, sub $1g/m_N^3$.

Datele referitoare la dimensiunile de bază ale reactorului și eficiența gazeificării, au stat la baza dimensionării gazeificatorului realizat pentru cercetările experimentale. Acesta a fost conceput pentru o cantitate de $1kg/h$, combustibilul primar având caracteristicile constructive prezentate în figura 5.3. Astfel gazogenul reprezintă:

- Un reactor cilindric;
- Alimentare superioară cu combustibil primar,
- Curgere descendentă
- Aer uniform distribuit prin 4 conducte pe înălțimea zonei de combustie;
- Existența unui grătar la baza patului de jar.

Calculul de dimensionare au indicat un diametru de 80 mm și o lungime de 400 mm din care 230 este lungimea activă.

Instalația pilot este cu alimentare discontinuă. Pentru pornire, patul de jar se realizează în exteriorul instalației (soluție utilizată la multe instalații din generația Lurgi). Urmează introducerea combustibilului primar și admisia aerului cu o suprapresiune de 1.1-1.2 bar. Debitul de aer este admis de un compresor, este măsurat cu ajutorul unui rotametr, cu respectarea excesului impus. Temperatura stratului de jar este măsurată cu ajutorul unui termocuplu de înaltă temperatură. În figura 5.6. este o fotografie a ansamblului instalației. Măsurarea componentelor gazului de gazogen se realizează cu un analizor TESTO 350 la evacuarea gazului de gazogen în atmosferă. Așa cum se arată în fotografia 5.9, s-au realizat și probe de aprindere în atmosferă a gazului de gazogen.

Experimentările au cuprins 3 calități de biomasă vegetală, formată din paie de cereale, pelete de paie de cereale și lemn (30%) și pelete de paie de cereale cu rezultatele prezentate în tabelul 5.4. Cercetările experimentale au cuprins și gazeificarea cu succes a cojilor de nucă, un combustibil posibil local destul de întâlnit.

Experimentările referitoare la cel mai dificil combustibil primar testat reprezentat de paietele de cereale au confirmat eficiența tehnologiei propuse, și anume:

- Reactor cu corp cilindric cu diametru constant, cu curgere descendentă;
- Utilizarea unei admisii uniforme distribuite pe înălțimea zonei de combustie;
- Menținerea excesului de aer în limitele optime, $\lambda = 0.3 \div 0.5$.

Datele experimentale au fost validate prin concordanța gradului de conversie CO_2 în CO prin reacția de reducere în strat, prin respectarea legii Boudouard (reprezentată prin corespondența temperaturii strat-grad de conversie CO_2 în CO).

Datele experimentale au fost completate și cu cele obținute la gazeificarea cojilor de nucă.

Capitolul s-a încheiat cu recomandări generale.

Capitolul 6 "Decarbonarea gazelor de ardere prin gazeificare", reprezintă o altă posibilă aplicare a rezultatelor obținute. Se are în vedere conversia componentei CO_2 din gazele de ardere în CO în stratul (patul) de jar. Studiile s-au efectuat pentru varianta de gazogen dezvoltată pentru gazeificarea biomasei vegetale. Pentru o funcționare eficientă, gradul de conversie CO_2 în CO , s-a impus a fi de minimum 95%, astfel ca temperatura să fie mai mare de $850^\circ C$.

Această temperatură se va obține prin arderea unei părți din patul fix de carbon format din mangal printr-o anumită cantitate de aer sau oxigen introdusă în reactor (masa de carbon arsă va trebui completată, astfel că în lucrare s-a prezentat un bilanț, temperatură, conținut de O_2 și masă de carbon introdusă).

Capitolul se încheie cu o analiză a posibilităților de utilizare a gazului rezultat după conversia CO_2 în CO .