



**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE  
POLITEHNICA BUCUREȘTI  
FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ ȘI MECATRONICĂ  
DEPARTAMENTUL TERMOTECNICĂ, MOTOARE, ECHIPAMENTE TERMICE ȘI  
FRIGORIFICE**

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA BUTANOLULUI LA MOTOARELE CU  
APRINDERE PRIN SCÂNTEIE DE AUTOMOBIL**

**RESEARCHES REGARDING THE BUTANOL USE AT THE AUTOMOTIVE  
SPARK IGNITION ENGINE**

**Autor:** ing. Sandu Cristian-Claudiu

**Conducător:** Prof. dr. ing. Constantin Pană

<b>Președinte</b>	Prof. dr. ing. Octavian DONȚU	<b>de la</b>	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București
<b>Conducător doctorat</b>	Prof. dr. ing. Constantin PANĂ	<b>de la</b>	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București
<b>Referent oficial</b>	Prof. dr. ing. Eugen GOLGOȚIU	<b>de la</b>	Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
<b>Referent oficial</b>	Prof. dr. ing. Cornel COFARU	<b>de la</b>	Universitatea „Transilvania” din Brașov
<b>Referent oficial</b>	Conf. dr. ing. Alexandru CERNAT	<b>de la</b>	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București

**BUCUREȘTI,  
2024**

## Cuprins

Introducere .....	3
CAPITOLUL 1 .....	5
RELEVANȚA TEMEI DE CERCETARE. OBIECTIVELE LUCRĂRII .....	5
1.1 Introducere relevanța temei de cercetare.....	5
1.2 Tehnologii de obținere a butanolului.....	8
1.3 Obiectivele tezei de doctorat.....	9
CAPITOLUL 2 .....	9
ANALIZA STADIULUI ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN DOMENIU .....	9
2.1 Influența butanolului asupra arderii.....	9
2.2 Influența butanolului asupra presiunii din cilindru.....	10
2.3 Influența butanolului asupra stabilității arderii.....	11
2.4 Influența butanolului asupra consumului specific de combustibil .....	11
2.5 Influența butanolului asupra randamentului volumetric.....	13
2.6 Influența butanolului asupra randamentului termic .....	13
2.7 Influența butanolului asupra emisiilor poluante.....	14
CAPITOLUL 3 .....	16
REZULTATE ALE INVESTIGAȚIILOR EXPERIMENTALE .....	16
3.1 Descrierea standului de încercări, echipamentelor și procedurii de efectuare a investigațiilor experimentale .....	16
3.2 Rezultate ale investigațiilor experimentale motorului alimentat cu amestec 10% butanol- benzină.....	18
3.2.1 Amestecuri bogate .....	18
3.2.2 Amestecuri sărace.....	19
3.3 Rezultate ale investigațiilor experimentale motorului alimentat cu amestec 15% butanol- benzină.....	20
3.3.1 Amestecuri bogate .....	20
3.3.2 Amestecuri sărace.....	21
3.4 Consumul specific energetic și randamentul termic .....	21
3.5 Concentrațiile emisiilor poluante.....	22
CAPITOLUL 4 .....	23
MODELAREA PROCESELOR TERMO-GAZODINAMICE DIN CILINDRUL MOTORULUI CU APRINDERE PRIN SCÂNTEIE .....	23
4.1 Noțiuni introductive .....	23
4.2 Descrierea modelului din AMESim .....	23
CAPITOLUL 5 .....	25

<b>COMPARAȚIE ÎNTRE REZULTATELE OBȚINUTE EXPERIMENTAL ȘI CELE OBȚINUTE PRIN SIMULARE NUMERICĂ .....</b>	<b>25</b>
<b>5.1 Amestecuri bogate .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2 Amestecuri sărace.....</b>	<b>25</b>
<b>CAPITOLUL 6 .....</b>	<b>26</b>
<b>CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE, DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE, DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRILOR EFECTUATE.....</b>	<b>26</b>
<b>6.1 Concluzii.....</b>	<b>26</b>
<b>6.2 Contribuții personale .....</b>	<b>27</b>
<b>6.3 Direcții viitoare de cercetare .....</b>	<b>28</b>
<b>6.4 Diseminarea rezultatelor cercetărilor efectuate .....</b>	<b>28</b>
<b>BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ .....</b>	<b>30</b>

**Cuvinte cheie:** amestecuri butanol-benzină, butanol, benzină, motor cu aprindere prin scântee de automobil, putere calorifică inferioară, coeficient de variabilitate, concentrațiile emisiilor poluante, monoxid de carbon, dioxid de carbon, hidrocarburi nearse, oxizi de azot, consum specific energetic, presiune maximă, presiune medie indicată, legile de ardere, variația vitezei de degajare a căldurii

## **Introducere**

Teza de doctorat *intitulată CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA BUTANOLULUI LA MOTOARELE CU APRINDERE PRIN SCÂNTEIE DE AUTOMOBIL (RESEARCHES REGARDING THE BUTANOL USE AT THE AUTOMOTIVE SPARK IGNITION ENGINE)* face parte din preocupările colectivului de cercetare al Departamentului de Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice (TMETF), Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică (FIMM) din Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București. Teza conține contribuții originale în domeniul cercetării utilizării butanolului la alimentarea motoarelor cu aprindere prin scântee de automobile. Lucrarea se ocupă de asemenea de modelarea și simularea termo-gazodinamică a motorului cu aprindere prin scântee pornind de la librăriile existente ale instrumentului software AMESim pentru a studia influența utilizării amestecurilor de butanol-benzină la alimentarea motorului.

**Capitolul 1** face o sinteză generală a contextului internațional care a dus la necesitatea utilizării combustibililor alternativi la motoarele cu aprindere prin scântee; sunt prezentate de asemenea câteva studii relevante despre rezultatele obținute de alți autori la alimentarea motoarelor cu aprindere prin scântee cu amestecuri de butanol-benzină. Capitolul prezintă de asemenea o descriere scurtă a proprietăților butanolului și a tehnologiilor de obținere a acestuia. Un mare avantaj al butanolului este că poate fi transportat utilizând infrastructura existentă.

**Capitolul 2** realizează o investigație detaliată a stadiului actual al cercetării în domeniul utilizării butanolului la motoarele cu aprindere prin scântee de automobile. În cadrul acestui capitol sunt prezentate studii legate de influența butanolului asupra arderii, presiunii din cilindru, asupra stabilității arderii, consumului specific de combustibili, randamentului volumetric, randamentului

termic și asupra concentrațiilor emisiilor poluante. Studiile prezentate au utilizat butanol în procentaje de la 2,5% până la 100%.

**Capitolul 3** descrie standul de încercări, echipamentele și procedura de efectuare a investigațiilor experimentale. Rezultatele obținute sunt prezentate începând cu amestecul de 10% butanol-benzină la amestecuri bogate și la amestecuri sărace respectiv cu amestecul de 15% butanol-benzină. Rezultatele de referință sunt stabilite la alimentarea motorului cu benzină. Sunt prezentate presiunea maximă, presiunea medie indicată, viteza de creștere a presiunii în timpul arderii, coeficienții de variabilitate ai presiunii maxime și presiunii medii indicate, unghiurile la care se degajă 5%, 50% și 90% din căldură, variația vitezei de degajare a căldurii, legile de ardere, consumul specific energetic, randamentul termic și concentrațiile emisiilor poluante.

**Capitolul 4** se ocupă cu descrierea procesului de modelare și simulare precum și prezentarea modelului de la care se pleacă modelarea termo-gazodinamică a motorului cu aprindere prin scânteie. Activitatea de modelare este împărțită în două părți principale 1) prezentarea sub-modelelor principale precum și a ecuațiilor din spate și 2) parametrizarea modelului. La finalul capitolului se face o scurtă comparație între rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare numerică la utilizarea benzinei.

**Capitolul 5** face o comparație mai detaliată între rezultatele obținute experimental și cele obținute prin simulare numerică la utilizarea benzinei și a amestecurilor de butanol-benzină. Finalizarea cu succes a etapelor de adaptare, parametrizare și validare a modelului matematic, face posibilă aprofundarea analizei utilizării butanolului la motoarele cu aprindere prin scânteie de automobile. În cadrul capitolului sunt prezentate diagramele indicate, presiunea maximă, variația vitezei de creștere a presiunii în timpul arderii, variația vitezei de degajare a căldurii și legile de ardere la amestecuri bogate și sărace.

**Capitolul 6** prezintă concluziile finale ale tezei de doctorat respectiv contribuțiile personale și direcțiile următoare.

Lucrarea se încheie cu lista lucrărilor publicate in extenso și referințele bibliografice în ordinea citării lor în text.

## Mulțumiri

Mulțumesc lui Dumnezeu pentru sănătatea și puterea de muncă primite pentru elaborarea acestei lucrări, în cadrul căreia am avut privilegiul și m-am bucurat de colaborarea unor specialiști cu calități profesionale și umane de excepție din cadrul Departamentului de Termotehnică, Motoare, Echipamente Termice și Frigorifice, Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică din Universitatea Națională și Tehnologie POLITEHNICA București, cărora doresc să le mulțumesc.

Doresc să exprim recunoștință, respectul și mulțumirile mele conducătorului de doctorat, domnului **prof. dr. ing. Constantin PANĂ** pentru răbdarea cu care m-a susținut, pentru competența profesională și calitățile umane deosebite, pentru sprijinul profesional cu care m-a îndrumat pe parcursul elaborării tezei de doctorat și nu în ultimul rând pentru motivarea și determinarea pe care mi le-a insuflat pe toată perioada studiilor de doctorat.

Doresc de asemenea să le mulțumesc domnului **prof. dr. ing. Nicolae NEGURESCU** și domnului **conf. dr. ing. Alexandru CERNAT** pentru sprijinul profesional cu care m-au îndrumat pe parcursul elaborării tezei de doctorat dar nu în ultimul rând pentru îndrumarea, sprijinul, motivarea și determinarea pe care mi le-au insuflat atât pe parcursul anilor de licență și master precum și în perioada studiilor de doctorat.

Doresc să le mulțumesc de asemenea domnului **ș.l. dr. ing. Dinu FUIORESCU** și domnului conf. **dr. ing. Cristian NUȚU** pentru ajutorul profesional, prietenia lor precum și pentru colaborarea științifică.

Autorul

## **CAPITOLUL 1**

### **RELEVANȚA TEMEI DE CERCETARE. OBIECTIVELE LUCRĂRII**

#### **1.1 Introducere relevanța temei de cercetare**

Piața globală de energie oferă consumatorilor aproximativ 370 de exajouli de energie pe an, ceea ce este echivalent cu aproximativ 170 de milioane de barili de petrol pe zi sau aproximativ 11,73 terawați (TW) pe oră, [1]. Aproximativ 95% din această energie provine din combustibili fosili. Se estimează că aproximativ 10% din acest total de energie este produs de combustibili bio (biofuels). Biocombustibilii se prezintă a fi o soluție durabilă și regenerabilă comparativ cu combustibilii fosili, [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Biocombustibilii pot fi utilizați cu succes în motoarele cu ardere internă actuale fără modificări constructive. Procesul de obținere a unor biocombustibili noi este relativ simplu și ieftin, acesta constă în amestecarea acestor surse regenerabile (acetona, etanol, butanol, etc.) cu combustibili fosili. Procesul este ieftin și simplu comparativ cu procesul de obținere a unor biocombustibili prin tratamente chimice, [13].

În Decembrie 2018 a fost adoptată directiva (UE) 2018/2001, denumită „RED II”, care prevede ca până în 2030 cel puțin 32% din consumul energetic să provină din surse regenerabile. În sectorul transporturilor procentul de energie regenerabilă ar trebui să fie de 14%, [14]. În 2005 a fost demarat un program similar în Statele Unite ale Americii, denumit Standardul Combustibililor Regenerabili (Renewable Fuel Standard - RFS). Acest standard prevede ca toți combustibilii utilizați în domeniul transporturilor să conțină o cantitate minimă din surse regenerabile. Această cantitate minimă trebuie mărită anual, [15].

Utilizarea butanolului ca și combustibil în domeniul transporturilor poate reduce consumul de combustibili fosili cu 39-56% și emisiile cu efect de seră (CO<sub>2</sub>) cu până la 48% într-un ciclu de viață de autovehicul. Problema principală a butanolului ce întârzie utilizarea acestuia în motoarele cu ardere internă la scară largă este costul relativ ridicat de producție, [16], [17]. Cantitatea obținută de bio-butanol prin fermentarea ABE (acetona-etanol-butanol) este relativ scăzută, de aproximativ 12 – 18 g/L, [17], [18].

Un studiu efectuat de Alasfour pe un motor mono-cilindru, utilizând un amestec de 30% butanol-benzină, a determinat cu scădere cu 7% a puterii motorului comparativ cu alimentarea acestuia cu benzină, [23], [24]. Într-un studiu realizat de Dernote s-a determinat un amestec optim de 40% butanol-benzină pentru reducerea la minim a emisiilor de hidrocarburi nearchive într-un motor cu aprindere prin scânteie, injecție indirectă, [25]. La concentrații mai mari de 40% butanol s-a observat o creștere a emisiilor de hidrocarburi. Aditivarea benzinei cu butanol, chiar și în concentrații mici, a dus la stabilizarea arderii în special la amestecuri sărace reducând întârzierea la aprindere a combustibilului, însă fără să afecteze durata arderii principale. Din acesta rezultă o viteză laminară a flăcării similară pentru benzină și butanol. Dar s-a observat de asemenea că aditivarea

de butanol, chiar și în procentaje mici poate reduce coeficientul de variabilitate al presiunii medii indicate. Viteza laminară a flăcării este o proprietate fundamentală a amestecului aer-combustibil, necesară pentru a valida mecanismul de reacție chimică, pentru o mai bună înțelegere a procesului turbulent de ardere în motoarele cu aprindere prin scânteie. Multe studii au determinat viteza laminară a flăcării pentru amestec aer-etanol, atât numeric cât și experimental, puține studii s-au axat asupra determinării vitezei laminare a flăcării în cazul amestecului aer-butanol, [26].

Butanolul, în comparație cu metanolul prezintă anumite avantaje. Butanolul sau alcoolul butilic poate fi utilizat la alimentarea motoarelor cu aprindere prin scânteie cu mici modificări. Butanolul este mai puțin coroziv și poate fi transportat utilizând infrastructura existentă, [29]. Este mult mai puțin higroscopic decât metanolul astfel încât nu se poate contamina de la apă. Alcoolul butilic are de asemenea o densitate energetică mai mare decât metanolul și este miscibil cu benzina. Butanolul are de asemenea o căldură calorifică inferioară mult mai apropiată de cea a benzinei comparativ cu etanolului, un coeficient stoichiometric mai mare făcându-l mult mai compatibil cu benzina și cu strategiile actuale de control lambda. Un avantaj ar fi simplitatea de utilizare a butanolului ca un aditiv pentru flotele existente de vehicule, [29]. Pe scurt, proprietățile fizice al butanolului sunt mai apropiate de cele ale benzinei decât cele ale etanolului.

Dezavantajul butanolului față de benzină este căldura latentă de vaporizare mult mai mare. Pentru sisteme de injecție indirectă în poarta supapei, odată cu vaporizarea combustibilului are loc și răcirea masei proaspete admise în motor. Aceasta mărește densitatea amestecului combustibil și de asemenea și masa de încărcare. Costul producerii butanolului este mai ridicat decât cel al metanolului. Proprietățile fizice ale butanolului duc la o pulverizare mai slabă a jetului de combustibil la injecția acestuia, [30]. Pentru utilizarea metanolului și butanolului ca și combustibili alternativi în sectorul transporturilor, este important să li se îmbunătățească caracteristicile acestora. Una din metodele posibile este combinarea metanolului și butanolului deoarece dezavantajele metanolului ar fi reduse de butanol iar cele ale butanolului de metanol. Acest amestec trebuie însă investigat înainte de a fi recomandat, astfel încât atât metanolul cât și butanolul au proprietăți termodinamice și caracteristici de combustie diferite, [30].

În studiul realizat de Turner s-a cercetat un concept de amestec ternar de combustibil. Lucrarea acestuia însă nu a prezentat îmbunătățiri legate de performanțele/emisiile noului amestec carburant asupra motorului cu aprindere prin scânteie, [31]. Nazzal a investigat efectele asupra motorului amestecului benzină-etanol-metanol, [32]. Acesta a făcut diferite măsurători în diferite puncte de funcționare ale motorului. Amestecul carburant era realizat din 6% - etanol, 6% - metanol și 88% - benzină. Rezultatele obținute au fost comparate cu cele în cazul alimentării motorului cu benzină. Acest studiu a arătat că amestecul ternar de combustibil a dus la îmbunătățirea performanțelor motorului cu aprindere prin scânteie. Un studiu din 2016 realizat de Rodriguez-Anton și colab. a concluzionat că izo-butanolul are avantaje față de etanol în ceea ce privește densitatea energiei, raportul aer/combustibil, presiunea vaporilor și din punct de vedere al conținutului regenerabil, [33]. Într-un studiu efectuat de Balaji acesta a examinat diferite combinații de izo-butanol-etanol-benzină în procente diferite, de exemplu 10% etanol, 2,5% izo-butanol, 10% etanol și 5% izo-butanol, 10% etanol și 7,5% izo-butanol, [34]. Acesta a demonstrat că amestecul ternar poate îmbunătăți performanțele motorului reducând emisiile poluante în comparație cu benzina. Însă consumul de combustibil a crescut semnificativ în comparație cu benzina. Într-un alt studiu s-au investigat efectele utilizării unui amestec de etanol-metanol-benzină, rezultatele arătând o îmbunătățire a performanțelor motorului și reducerea emisiilor comparativ cu benzina, [35]. Într-un studiu condus de Elfasakhany, au fost obținute performanțe mai bune și emisii mai reduse

utilizând amestecuri de etanol și metanol (3-10% volum) în benzină, [36]. Același Elfasakhany a comparat rezultatele, performanțele și emisiile obținute între un amestec ternar de bioetanol-izo-butanol-benzină și un amestec dublu de izo-butanol-benzină, [37]. Aceste două amestecuri diferite au alimentat un motor de motocicletă. Amestecul ternar de bio-etanol-izo-butanol-benzină a îmbunătățit performanțele motorului termic (putere, moment motor și randament volumetric) față de amestecul dublu de izo-butanol-benzină. Performanțele motorului au fost puțin mai reduse față de cazul utilizării benzinei. Pe partea de emisii, s-au obținut valori scăzute pentru HC nearse și CO cu 15%, respectiv 20%, față de benzina și cu 9% și 14% față de amestecul izo-butanol-benzină. Elfasakhany a mai efectuat un studiu în care a examinat un amestec de n-butanol-izo-butanol-benzină și efectele acestuia asupra performanțelor și emisiilor motorului, [38]. Rezultatele au fost comparate cu cele obținute cu izo-butanol-benzină. Concluzia studiului a fost recomandarea utilizării amestecului ternar față de cel binar sau benzină. Efectele alimentării cu n-butanol și izo-butanol a unui motor mono-cilindru HCCI au fost studiate de J. Hunter, [39]. Au fost observate îmbunătățiri ale procesului de ardere iar n-butanol a fost mult mai stabil față de izo-butanol la amestecuri sărace. Într-un alt studiu efectuat de Siwale acesta a investigat un amestec de metanol-n-butanol-benzină (53% metanol, 17% n-butanol și 30% benzină) alimentând un motor cu aprindere prin scânteie și a comparat rezultatele cu un amestec dublu de metanol-benzină în diferite procentaje (70% vol. metanol -30% vol. benzină, M70, și 20% vol. metanol cu 80% vol. benzină, M20) și benzină, [40]. Emisiile de hidrocarburi nearse (HC) sunt cele mai mici în cazul amestecului ternar față de amestecul binar și benzină. De asemenea, amestecul ternar a obținut emisii mai mari de CO, NO<sub>x</sub> și CO<sub>2</sub> față de amestecul dublu.

Un studiu realizat în 2022 de către Tyler Lark și Nathan P. Handricks a analizat efectul emisiilor de carbon la producerea etanolului din porumb, [41]. Studiul este similar celui de producere al combustibililor convenționali (well-to-wheel – de la puț – la roată). Studiul a concluzionat că din punct de vedere al emisiilor de carbon, producția de etanol pe bază de porumb este cu 24% mai poluantă față de producția benzinei. În plus, acest proces de producție a etanolului poate avea impact asupra calității apei, a solului și a ecosistemelor din jur. Concluzia autorilor este că procesul de producție a bio-etanolului nu a reușit să-și atingă obiectivul de reducere a emisiilor de carbon. Acest studiu contrazice un alt studiu din 2022 publicat de Jan Lewandrowski, [42]. Concluzia studiului a fost că producția de etanol din porumb ar putea reduce emisiile de carbon între 39 și 43% față de producția de benzină. Alcoolii pot fi considerați o soluție alternativă bună întrucât numeroase studii au observat o îmbunătățire a randamentului motorului, reducerea consumului energetic și emisii poluante mai mici, [43], [44]. Utilizarea butanolului poate reduce presiunea pe producătorii de piese deoarece acesta este mai puțin coroziv în comparație cu etanolului și astfel poate fi utilizat fără probleme în sistemele actuale de alimentare și aprindere, [45].

Yacoub și colab. au cuantificat performanțele energetice și emisiile poluante pentru un motor cu aprindere prin scânteie optimizat să funcționeze cu amestecuri alcoolii (C<sub>1</sub> – C<sub>5</sub>)/benzină, [59]. Amestecul de etanol-benzină a avut cea mai mare îmbunătățire a rezistenței la detonație dintre toate amestecurile în timp ce alcoolii cu catenele C<sub>4</sub> – C<sub>5</sub> au avut o rezistență la detonație mai mică, comparativ cu benzina. De exemplu, în 2005, McEnally și Pfefferle au investigat flăcările celor patru izomeri de butanol prin măsurarea temperaturii și a compoziției chimice a acestora, [60]. Printre alte concluzii, autorii au descoperit că toți cei patru izomeri ai butanolului au produs concentrații mult mai mari de aldehide și cetone, ca specii intermediare, decât butanolul, fapt care este relevant în ceea ce privește formarea de poluanți atunci când butanolul este folosit drept

combustibil. În studiile realizate de Oßwald și colab. în 2011 și Frassoldati în 2012 au identificat 57 de compuși intermediari în flăcările celor patru izomeri de butanol, [61], [62]. Au existat și variații semnificative în grupul de compuși intermediari între izomerii butanolului, sugerând că și emisiile poluante pot varia în funcție de proprietățile chimice și concentrații. Moss și colab. au investigat autoaprinderea și întârzierea la aprindere a celor patru izomeri de butanol utilizând tuburi de șoc în 2008, [63]. Printre rezultatele lor, autorii au constatat 1-butanol a avut cea mai scurtă întârziere la aprindere, urmat de izobutanol în timp ce terț-butanolul și 2-butanolul au fost cele mai puțin reactive.

## 1.2 Tehnologii de obținere a butanolului

Cercetătorii s-au concentrat pe obținerea biocombustibililor din culturi comestibile, [64]. Această soluție nu este sustenabilă pe termen lung, scopul fiind obținerea de biocombustibili de înaltă calitate precum și alți compuși chimici din biomasă necomestibilă ieftină, [65], [66], [67], [68], [69]. Astfel, cercetătorii au propus transformarea biomasei lignocelulozice, majoritatea acesteia fiind reprezentată de deșeuri agricole. Odată cu dezvoltarea bio rafinăriei, s-a industrializat procesarea biomasei lignocelulozice, proces prin care se eliberează monozaharide care pot fi fermentate și transformate în substanțe chimice de înaltă calitate. Izobutanolul celulozic ocupă un loc important în sectorul combustibililor, [70].

Compușii oxigenați precum alcoolul butilic se prezintă ca o soluție atractivă de combustibili alternativi în sectorul de transporturi. Butanolul prezintă anumite avantaje de amestec cu benzina precum: presiune redusă de vaporizare (reducerea emisiilor volatile) conținut energetic mai mare, miscibilitate ridicată cu în amestecul cu benzina fără modificarea vehiculelor și reducerea emisiilor de monoxid de carbon (CO) și hidrocarburilor nearse (HC), [39], [71], [72]. În plus, butanolul prezintă anumite avantaje față de etanol precum posibilitatea de a se amesteca în orice procentaj cu benzina și utilizat la motoarele cu ardere internă moderne, [73], în timp ce etanolul poate fi amestecat cu benzina într-o proporție de aproximativ 10% fără modificări constructive, [74]. Temperatura de autoaprindere a butanolului este de 341°C, apropiată de cea a benzinei de 280°C ceea ce duce la ușurință de amestecare cu benzina, [75].

Izobutanolul poate fi obținut și din surse fosile prin hidroformilarea (denumită și sinteză oxo) a propilenei, urmată de hidrogenarea catalitică a aldehydelor formate în alcoolii corespunzători, metodă care produce simultan izobutanol, cât și 1-butanol, [76]. Un proces similar ar fi carbonilarea propilenei, cunoscută și sub denumirea de procesul Reppe, în care olefina, monoxidul de carbon și apa reacționează sub presiune în prezența unui catalizator, o metodă prin care se obțin izobutanol și 1-butanol direct din propilenă, [76].

Butanolul poate fi obținut și din surse regenerabile prin fermentația anaerobică a zahărului obținut din biomasă utilizând solventogenic clostridia și este cunoscut drept bio-butanol, [77]. Unii cercetători au început să dezvolte o tehnologie avansată de obținere a unei producții ridicate cu un cost optim de bio-butanol. În prezent, materiile prime pe bază de zaharoză și amidon din culturile agricole precum porumbul, grâul, orz, paie de orez, manioc, lemn etc. sunt utilizate intensiv ca materie primă pentru bio-butanol din cauza tehnologiei simple a procesului de obținere a zahărului pentru fermentație. Maniocul a fost utilizat în procesul de fermentație a bio-butanolului de unde rezultă 16,4-16,9 g/l butanol de unde rezultă un substrat de 0,26-0,35 g/g și un randament volumetric de 0,35-0,46 g/l/h, [78]. Creșterea utilizării bio-butanolului va duce la o necesitate mai



mare de materie primă de biomasă rezultată din culturi agricole. Astfel, securitatea hranei va deveni problema principală pentru obținerea unei surse de bio-butanol sustenabile.

### **1.3 Obiectivele tezei de doctorat**

Obiectivul general al tezei de doctorat este studiul impactului alimentării unui motor cu aprindere prin scânteie de automobil cu un amestec de butanol-benzină în diferite procentaje. Obiectivele specifice ale lucrării sunt:

1. Actualizarea informațiilor privind stadiul actual al cercetărilor din domeniul tezei.
2. Studiul impactului butanolului asupra performanțelor energetice ale motorului cu aprindere prin scânteie.
3. Studiul impactului butanolului asupra stabilității funcționării motorului cu aprindere prin scânteie.
4. Studiul impactului butanolului asupra emisiilor poluante ale motorului cu aprindere prin scânteie.
5. Modelarea proceselor de ardere din cilindrul motorului cu aprindere prin scânteie alimentat cu benzină, respectiv cu amestecuri butanol-benzină.
6. Validarea modelului fizico-matematic propus.

## **CAPITOLUL 2**

### **ANALIZA STADIULUI ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN DOMENIU**

#### **2.1 Influența butanolului asupra arderii**

Presiunea maximă din cilindru în cazul butanolului se obține puțin mai rapid față de benzină indicând o viteză de ardere mai mare a butanolului. Reducând avansul la declanșarea scânteii electrice se obține o suprapunere atât a valorii de presiune maximă cât și a unghiului la care se obține similar cu benzina, [82].

Evoluția presiunii din cilindru oferă informații legate de răcirea masei de încărcătură proaspătă introdusă în cilindru. La temperatura lichidului de răcire de 20°C, presiunea gazelor în cazul utilizării izo-octanului este cea mai mare pe cursa de comprimare a pistonului, între închiderea supapei de admisie și momentul declanșării scânteii electrice. A doua cea mai mare presiune este cea a benzinei urmată de cei doi alcoolii cu diferențe foarte mici. Căldura latentă de vaporizare mai ridicată a etanolului și butanolului, în comparație cu izo-octanul și benzina, poate duce la o răcire mult mai accentuată a amestecului proaspăt față de izo-octan, rezultând presiuni de comprimare mai scăzute, [82].

S. Szwaja și colab. au studiat aprinderea butanolului la utilizarea acestuia în motorul cu aprindere prin scânteie. Autorii au utilizat următoarele procentaje de butanol în amestec cu benzina: 0%, 20%, 60% și 100%. Motorul utilizat este un motor de cercetare de tipul CFR (cooperative fuels research) produs de Waukesha Motor Company, [83]. Motorul are un raport de comprimare (RC) variabil. Arderea este mai rapidă la alimentarea cu 100% butanol. Explicația ar fi arderea mult mai rapidă a butanolului comparativ cu benzină. Măsurătorile s-au făcut la un raport de comprimare

(RC) de 10, avans constant de 10°RAC înainte de PMI, presiune medie indicată de 330 kPa și amestecuri stoichiometrice, [83]. Se observă că butanolul simplu degajă 10% din căldură în aproximativ 16°RAC comparativ cu benzina în 17,6°RAC. Se observă astfel o reducere a duratei de 10% la alimentarea cu butanol simplu.

Se observă de asemenea o reducere a unghiului la care se degajă 50% din căldură odată cu creșterea procentului de butanol din amestec. Explicația ar fi întârzierea la aprindere mai mică a butanolului. Faza inițială a arderii este influențată în mare parte de viteza laminară a flăcării la aprinderea combustibilului. Celelalte faze ale arderii sunt influențate de propagarea turbulentă a flăcării. Diferența dintre  $\alpha_{50\%}$  al butanolului și  $\alpha_{50\%}$  al benzinei este de 2°. Unghiul de 50% reprezintă jumătate procesului din ardere iar momentul motor depinde foarte mult de unghiul acesta. Pentru a obține momentul motor maxim, avansul la scânteie trebuie ajustat în funcție de procentul de benzină înlocuit de butanol, [83].

Se observă tendința de degajare mai rapidă a căldurii la alimentarea cu butanol (durată de ardere mai mică în faza inițială) însă viteza maximă de degajare rămâne similară în toate cazurile investigate. Autorii concluzionează că adiția de butanol nu influențează semnificativ legea de ardere și nici variația vitezei de degajare a căldurii. Pentru optimizarea fazelor arderii autorii recomandă ajustarea avansului la scânteie în funcție de procentajul de butanol din amestec, [83].

## 2.2 Influența butanolului asupra presiunii din cilindru

Se observă efectul limitat al amestecului n-butanol-metanol-benzină (nBM) asupra presiunii medii indicate. Utilizând amestecul de 3% nBM3, presiunea maximă din cilindru este mai mică cu 8% față de benzină. Utilizând un volum mai mare de alcoolii în amestec cu benzina nu produce o creștere semnificativă a presiunii. Reducerea presiunii maxime efective în cazul nBM3 este cauzată de căldura calorifică inferioară (mai mică comparativ cu benzina) a metanolului și n-butanolului. Creșterea presiunii medii efective din cilindru la alimentarea cu nBM7 și nBM10 este datorată îmbunătățirii randamentului volumetric și prin îmbunătățirea arderii, [30]. Amestecul de 3% nBM3 duce la o scădere semnificativă atât a momentului motor cât și a puterii, în special la turații mai mari. Această scădere este observată la alimentarea cu toate amestecurile investigate. Căldura de vaporizare a alcoolilor este mai mare comparativ cu cea a benzinei rezultând într-o scădere a momentului motor și implicit a puterii motorului, [30].

Tan Tien Huynh și colab. au studiat influența butanolului asupra presiunii din cilindru. Procentajele de butanol utilizate de autori sunt 10%, 30% și 50%. Măsurătorile s-au făcut la diferite sarcini și turații. Se observă o scădere graduală a presiunii maxime odată cu creșterea procentajului de butanol din amestec. De exemplu, se observă o scădere cu 12%, respect 19% la alimentarea motorului cu Bu30 și Bu50. La turații mari și la sarcina de 30% se observă o ușoară creștere a presiunii maxime la alimentarea cu Bu10 și Bu30 între 6% și 8%. La procentaje de butanol mai mari de 30% se observă o scădere a presiunii maxime cu 6% comparativ cu benzina Bu0, [88].

La sarcini mari (70%) și turații de 2250 rot/min se observă că presiunea cea mai mare se obține la alimentarea cu benzină. Presiunea maximă obținută de amestecurile de butanol scade gradual odată cu creșterea concentrației de butanol. De exemplu, la alimentarea cu Bu10 presiunea maximă scade cu 11,5%. În cazul Bu30 presiunea maximă scade cu 13% iar la alimentarea cu Bu50 scade cu 17%. Explicația pentru aceste scăderi ar fi căldura calorifică inferioară mai mică a amestecurilor de benzină-butanol. Aceleași rezultate se observă și la turații de 4250 rot/min,

presiunea maximă scăzând odată cu creșterea concentrației de butanol. La amestecuri sărace combustibilul arde mai lent față de amestecuri stoichiometrice și astfel presiunea maximă obținută este mai mică. Viteza de propagare a flăcării scade odată cu creșterea procentajului de butanol din amestec. Avansul la declanșarea scânteii electrice a fost același pentru toate regimurile de funcționare a motorului, [88].

Stanislaw Szwaja și colab. au studiat impactul butanolului și glicerinei (glicerol) asupra performanțelor motorului cu aprindere prin scânteie. Amestecurile propuse de autori sunt: benzină 95 (utilizată pe piețele europene), n-butanol (puritate 99,9%) și n-butanol 75% - glicerol 25%, [89]. Autorii au concluzionat că amestecurile investigate nu au dus la deteriorarea presiunii medii efective și nici a randamentului indicat. Acești parametri au prezentat o ușoară îmbunătățire datorită temperaturii mai mici a gazelor de evacuare reducându-se pierderile termice.

Într-un alt studiu realizat de Szwaja și colab. s-a investigat influența butanolului asupra presiunii din cilindru. Autorii au obținut cea mai mare presiune alimentând motorului cu 100% butanol iar cea mai mică presiune cu benzină simplă. Presiunea maximă din cilindru crește odată cu procentajul de butanol din amestec. Presiunea maximă se obține mai rapid la alimentarea cu butanol deoarece acesta arde mai rapid decât benzina, [83].

### **2.3 Influența butanolului asupra stabilității arderii**

Se observă că adăugarea de oxigen îmbunătățește procesul de ardere prin reducerea coeficientului de variație (COV) a presiunii medii indicate. Îmbunătățirea procesului de ardere pare să nu depindă prea mult de concentrația de butanol din amestecul format, în special la amestecuri stoichiometrice, deoarece se observă o reducere similară a COV-ului atât la concentrația de 20% cât și la 40%, 60% și 80%. Același lucru nu poate fi spus la alimentarea cu amestecuri de benzină-etanol în procentaje mai mari de 10%. O reducere a COV-ului pentru presiunea medie indicată poate fi obținută și la amestecarea benzinei cu 10% etanol, însă, la concentrații de etanol mai mari de 20% se observă o instabilitate mai mare a amestecului față de benzină, [81].

Autorii concluzionează că adăugarea de butanol, chiar și în procentaje mici poate îmbunătăți stabilitatea arderii prin reducerea coeficientului de variație al presiunii medii indicate, în special la amestecuri sărace. S-a observat de asemenea o reducere a întârzierii la aprindere cu 2 – 3 °RAC. Durata arderii principale a fost similară pentru toate amestecurile utilizate, [25].

La alimentarea cu benzină s-a obținut un COV de 1,24% iar la alimentarea cu butanol un COV de 0,91%. Autorii au afirmat că butanolul poate fi considerat ca un bun înlocuitor al benzinei din punctul de vedere al stabilității arderii, [83].

### **2.4 Influența butanolului asupra consumului specific de combustibil**

Unul din avantajele butanolului ca soluție alternativă este raportul aer-combustibil mai mare comparativ cu etanolul. O entalpie de combustie (EC) mai mare a butanolului s-ar traduce printr-o creștere mai mică a consumului specific energetic comparativ cu etanolul. Așa cum era de așteptat, consumul specific de combustibil crește odată cu creșterea concentrației de butanol (o creștere cu aproximativ 28% față de benzină la alimentarea cu B80). Consumul specific relativ obținut la regimul de 2000 rot/min și la o presiune medie indicată de 367 kPa. Consumul specific de combustibil este mai mic în cazul butanolului dacă ar fi să-l comparăm cu etanolul (E100) unde

creșterea consumului a fost de 59%, [84]. În cazul amestecului de 50% etanol-benzină (E50) consumul specific de combustibil poate crește cu 19%, [85]. Consumul specific poate crește cu aproximativ 27% la alimentarea cu E60, [86]. Creșterea relativ mică a consumului specific de combustibil la alimentarea cu butanol poate fi atribuită entalpiei de combustie mai mare a acestuia, [25]. Se observă că pentru fiecare amestec utilizat creșterea consumului specific de combustibil este relativ constantă odată cu creșterea sarcinii motorului. O evoluție similară a fost observată de He B.-Q. și colab. la alimentarea cu E30. La regimuri constante și la creșteri mici ale sarcinii motorului consumul specific de combustibil poate crește cu valori cuprinse între 5% și 8%, [87].

Tan Tien Huynh și colab. au studiat influența amestecurilor de butanol-benzină asupra consumului specific de combustibil. Autorii au făcut încercări pe motor cu aprindere prin scânteie Daewoo A16DMS cu o cilindree de 1,6L și un raport de comprimare de 9,5. Se observă că la procentaje mai mici de 30% consumul specific de combustibil al amestecurilor de butanol-benzină este mai mic comparativ cu benzina. Acest consum specific mai mic poate fi explicat de scăderea momentului motor și a puterii motorului la alimentarea cu amestecurile de butanol. De exemplu, la o sarcină de 30% și turația de 2250 rot/min se observă o reducere a consumului specific de combustibil de aproximativ 3,6% la alimentarea cu Bu20. La turația de 4250 rot/min această reducere a consumului specific de combustibil este de 8,4%. Se observă de asemenea că la o concentrație mai mare de 30% de butanol, consumul specific începe să crească foarte mult. Aceasta înseamnă că pentru aceleași condiții de funcționare se consumă o cantitate mai mare de butanol-benzină. Această creștere mare de consum specific de combustibil este cauzată de raportul aer-combustibil mai mic al butanolului (11 VS 14,6 pentru benzină) și de căldura calorică inferioară mai mică a acestuia față de benzină (33 MJ/kg VS 43 MJ/kg), [88].

Yousif și colab. au studiat impactul amestecurilor de butanol-benzină asupra performanțelor motoarelor cu aprindere prin scânteie. Aceștia au utilizat amestecuri cu concentrații de la 25% până la 50% butanol. Măsurătorile s-au făcut la sarcini constante și la regimuri diferite, atât cu benzină cât și cu amestecuri de benzină-butanol. Benzina utilizat are o cifră octanică de 94, de proveniență din Irak, [90]. Cel mai mare dezavantaj al alcoolilor este puterea calorică inferioară mai mică față de benzină. Consumul specific de combustibil este mai mare în cazul ambelor amestecuri (B75Bu25 și B50Bu50) comparativ cu benzina (B). La turații mai mari se observă un consum mai mic față benzină la alimentarea cu B75Bu25 însă B50Bu50 va avea în continuare un consum mai mare față de benzină. Pentru domeniul de turații investigat s-a observat un consum specific de combustibil mare cu aproximativ 2,38% la alimentarea cu G50Bu50. Rezultatele au fost influențate de căldura calorică a butanolului care este apropiată de cea a benzinei. De exemplu, impactul căldurii calorifice inferioare nu este foarte mare la concentrații mai mici de butanol cum ar fi 25%. În acest caz, butanolul îmbunătățește arderea și stabilitatea arderii prin adăugarea de oxigen și astfel se obține un consum specific de combustibil mai mic comparativ cu benzina. Impactul căldurii calorifice inferioare a butanolului se resimte dacă este utilizat în concentrații mai mari cum ar fi 50%, consumul specific de combustibil fiind mai mare. Această creștere a consumului specific de combustibil a fost totuși limitată în cazul B50Bu50, așa cum au observat și Yu Li și colab., [94].

Într-un alt studiu realizat de Manish Saraswat și colab. s-a obținut un consum specific de combustibil minim utilizând un amestec de 5% butanol cu benzină. Autorii au utilizat un motor cu aprindere prin scânteie de la Honda, [95]. BB5 are cel mai mic consum specific, foarte apropiat de cel al benzinei, în timp ce BB15 are cel mai mare consum. Consumul mai mare de combustibil în cazul BB15 este explicat de puterea calorică inferioară mai mică a butanolului care se resimte la

procentaje mai mari în amestec. Consumul specific de combustibil mai mic poate fi de asemenea explicat de un randament termic mai mare la alimentarea cu BB5, [95].

## **2.5 Influența butanolului asupra randamentului volumetric**

Într-un studiu publicat, Ashraf Elfasakhany și Abdel-Fattah Mahrous au investigat influența amestecurilor de metanol și butanol asupra performanțelor și emisiilor motorului cu aprindere prin scânteie. Motorul a funcționat la plină sarcină, la turații de 2600 până la 3400 rot/min. Au fost măsurate presiunea și temperatura din colectorul de admisie, presiunea din cilindru, temperatura gazelor de evacuare, momentul motor, puterea și randamentul volumetric. Se observă că odată cu creșterea turației, scade și randamentul volumetric din cauza pierderilor gazodinamice și prin frecare în galeria de admisie. Se observă de asemenea că amestecul de n-butanol-metanol-benzină are un randament volumetric mai mic față de benzină. Motivul pentru această scădere este presiunea scăzută de vaporizare a n-butanolului (2,27 kPa) în comparație cu benzina (31 kPa). Astfel, o cantitate mare de combustibil se vaporizează în admisia motorului.

Mărind procentajul de alcool în benzină, se preconizează o creștere a randamentului volumetric, chiar depășind valorile obținute pentru benzină, [30]. Într-un studiu realizat de Feng s-a obținut un randament volumetric mai mare față de benzină utilizând un amestec de 35% butanol-benzină, [104].

D. Balaji și colab. au studiat influența amestecurilor de izo-butanol la alimentarea motoarelor cu aprindere prin scânteie. Autorii au utilizat dozajul de putere maximă la alimentarea cu benzină. Încercările s-au făcut la turații constante și la o sarcină a motorului de 75%. S-au măsurat următorii parametri: turația motorului, momentul motor, durata de consum a 100 cm<sup>3</sup> de combustibil, emisiile de CO, HC, NO<sub>x</sub> și temperatura gazelor de evacuare. Parametrii precum consumul specific de combustibil, randamentul volumetric, puterea și randamentul termic au fost calculați utilizând ecuațiile uzuale. Amestecurile utilizate sunt formate din benzină (de la 82,5% până la 87,5%), etanol 10% și izo-butanol (de la 2,5% până la 7,5%), [34]. Randamentul volumetric este mai mare la alimentarea cu amestecurile de izo-butanol-etanol-benzină comparativ cu benzina. De asemenea randamentul crește odată cu creșterea momentului motor până la valoarea de 0,85 Nm de unde începe să scadă pentru toți combustibilii. Îmbunătățirea randamentului volumetric poate fi explicată de răcirea încărcăturii proaspete la sfârșitul procesului de admisie. Temperatura încărcăturii proaspete este de asemenea redusă de vaporizarea din galeria de admisie. Randamentul volumetric începe să scadă după 0,85 Nm deoarece cantitatea de aer admisă în motor nu mai poate crește (apare fenomenul de sufocare – chocking în sistemul de admisie).

## **2.6 Influența butanolului asupra randamentului termic**

D. Balaji și colab. au calculat randamentul termic în funcție de momentului motor la alimentarea cu amestecuri (în diferite procentaje) de izo-butanol-etanol-benzină. Aceștia au observat că prin adăugarea de 2,5% de izo-butanol se poate obține randamentul termic maxim, [34].

Yousif și colab. au studiat de asemenea impactul butanolului asupra randamentului termic. Randamentul termic îmbunătățit poate duce la scăderea consumului specific de combustibil. Se observă o ușoară îmbunătățire a randamentului termic la alimentarea cu amestecuri de butanol.

Randamentul termic a crescut cu 3,63% pentru B75Bu25 și cu 1,8% pentru B50Bu50 comparativ cu benzina. Prezența butanolului în camera de ardere poate îmbunătăți viteza de ardere, oxidarea fiind completă datorită oxigenului suplimentar din camera de ardere, [90].

Prezența oxigenului poate îmbunătăți arderea și randamentul termic. Miscibilitatea mare a butanolului, comparativ cu alți alcooli, îl face ideal la amestecuri în procentaje mai mari cu benzina, [95].

## 2.7 Influența butanolului asupra emisiilor poluante

Prezența monoxidului de carbon în gazele de evacuare este un semn al arderii incomplete și poate fi considerat o măsură a pierderii puterii din motor. Odată cu creșterea turației motorului crește și puterea acestuia și astfel scad și emisiile de CO și HC. Amestecurile de n-butanol-metanol-benzină prezintă emisii de monoxid de carbon mai mici față de benzină. Utilizarea alcoolilor în benzină nu prezintă modificări ale emisiilor de CO până pe la 3100 rot/min unde se observă o scădere bruscă de CO. Prezența oxigenului din n-butanol și metanol duc la îmbunătățirea arderii din cilindru și astfel la scăderea emisiilor de CO și HC. Procentajul de n-butanol-metanol în benzină are un impact mare asupra emisiilor. Astfel, nBM3 are efecte negative atât asupra performanțelor motorului cât și asupra emisiilor. Creșterea procentajului de la nBM3 la nBM10 duce la scăderea emisiilor de CO și HC prin aportul de oxigen dar în continuare emisiile sunt în medie mai mari față de benzină, [30].

Se observă o tendință opusă monoxidului de carbon, unde concentrațiile de CO<sub>2</sub> depind în principal de amestecul aer-combustibil precum și de cele de CO și HC. Un amestec mai sărac presupune o ardere mai completă și astfel concentrații de CO<sub>2</sub> mai mari în gazele de evacuare. Odată cu creșterea concentrației de n-butanol-metanol în benzină cresc și concentrațiile de CO<sub>2</sub> în timp ce CO și HC sunt în scădere. Explicația este conținutul suplimentar de oxigen care duce la o ardere mai completă în cilindru, [30].

Concentrațiile ridicate de hidrocarburi nense HC și monoxid de carbon CO ale combustibililor obținuți prin amestec cu alcoolii precum și emisiile reduse de CO<sub>2</sub> față de benzină sunt de asemenea cauzate și de reacții intermediare ce au loc spre finalul procesului de ardere. Aceste reacții secundare depind de unii factori precum temperatura camerei de ardere, aportul de oxigen, etc. În cazul combustibililor oxigenați, concentrațiile de oxigen nu limitează aceste reacții însă temperatura da. Alcoolii n-butanol și metanolul au o putere calorică mai mică și de asemenea o căldură latentă de vaporizare mai mare față de benzină, prin urmare, temperatura în camera de ardere este mai mică (confirmată de presiunea maximă în cilindru mai mică și de temperatura redusă a gazelor de evacuare) și astfel este înfrânat procesul de conversie a monoxidului de carbon și hidrocarburilor nense în dioxid de carbon. În unele cazuri, aceste reacții de conversie sunt "înghețate". Astfel, concentrațiile de CO și HC au tendința de a crește în timp de emisiile de CO<sub>2</sub> sunt în scădere. Un factor important ce are influență asupra emisiilor este coeficient de exces de aer λ. Prin mărirea procentajului de alcoolii din benzină, amestecul devine din ce în ce mai sărac și astfel emisiile de CO și HC au tendința să scadă în timp ce CO<sub>2</sub>-ul va crește, [30].

D. Balaji și colab. au studiat influența etanolului și izo-butanolului asupra concentrațiilor emisiilor motorului cu aprindere prin scânteie. Autorii au obținut emisii cu concentrații mai mici la alimentarea cu amestecurile investigate comparativ cu benzina. Cele mai mici concentrații de

CO au fost obținute cu amestecul de 5% izo-butanol deoarece adăuga de izo-butanol a îmbunătățit arderea din cilindru. Similar, cele mai mici concentrații de HC au fost obținute cu un procent de 5% izo-butanol. Concentrațiile emisiilor de oxizi de azot au crescut la alimentarea cu amestecurile de izo-butanol-etanol. Concentrațiile de  $\text{NO}_x$  cresc odată cu creșterea procentajului de etanol din benzină însă acestea cresc și mai mult la alimentarea cu amestecurile de izo-butanol-etanol. Autorii concluzionează că se cele mai reduceri ale concentrațiilor emisiilor poluante pot fi obținute cu amestecul de 5% izo-butanol și 10% etanol, [34].

Huynh, T.T și colab. au investigat impactul butanolului (în diferite procentaje) asupra concentrației emisiilor poluante. Emisiile de CO scad odată cu creșterea procentului de butanol din amestec. Oxigenul suplimentar din camera de ardere precum și conținutul de carbon redus al amestecurilor de butanol îmbunătățesc arderea din cilindru, contribuind la scăderea concentrațiilor de CO.

Hydrocarburile nearse pot fi rezultatul aprinderilor ratate și/sau arderii incomplete din cilindru. Acestea depind de asemenea de condițiile de funcționare ale motorului precum și de proprietățile combustibililor utilizați, [49]. La sarcini de 30% se observă că emisiile de HC scad odată cu creșterea concentrației butanolului. Această scădere a concentrațiilor de HC are loc doar până la procentaje mai mici de 30% butanol. La procentaje mai mari de 30% butanol temperatura din timpul arderii scade și astfel se înrăutățește vaporizarea și calitatea amestecul de aer-combustibil. În consecință arderea este incompletă și astfel cresc concentrațiile de HC. La sarcina de 70% și turația de 2250 rot/min, concentrațiile de HC prezintă o evoluție similară ca în cazul concentrațiilor de CO, fiind mai mici comparativ cu benzina. Explicația ar fi conținutul redus de carbon și arderea completă a combustibilului. La turații de 4250 rot/min și sarcini mari comportamentul este similar ca în cazul sarcinilor mici, după un anumit procentaj de butanol arderea se înrăutățește și vor crește concentrațiile de HC, [88].

Formarea oxizilor de azot depinde de mai mulți factori precum sarcina motorului, temperatura din cilindru, conținutul din camera de ardere și densitatea amestecului, [49], [93]. Concentrațiile de oxizi de azot sunt mai mari la alimentarea cu amestecuri de benzină-butanol. Cele mai mari concentrații sunt obținute la sarcini mari de 70%. De exemplu, la alimentarea cu Bu25 la sarcini de 30% și turația de 2250 rot/min, concentrațiile de  $\text{NO}_x$  cresc cu 22% față de benzină (Bu0). Tot în cazul Bu25, la sarcini de 30% și turații de 4250 rot/min  $\text{NO}_x$ -ul crește cu 47%. La sarcini de 70% concentrațiile cresc cu 33% și cu 52% la turațiile de 2250 rot/min respectiv 4250 rot/min, [88].

Se obțin cele mai mari concentrații de  $\text{CO}_2$  la turații de 2250 rot/min. Explicați ar fi conținutul suplimentar de oxigen și sărăcirea suplimentară a amestecului (dozajul nu este modificat în timpul încercărilor). La procentaje mai mari de butanol se obțin amestecuri mai sărace și astfel scad concentrațiile de  $\text{CO}_2$ . De exemplu, la alimentarea cu Bu40 la sarcina de 30% și turația de 4250 rot/min concentrațiile de  $\text{CO}_2$  scad cu aproximativ 9%. La aceeași turație, dar la sarcina de 70% concentrațiile scad cu 8%. Cele mai mici concentrații de  $\text{CO}_2$  se obțin la turații mari de 4250 rot/min și sarcini mari de 70%. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că la sarcini mici ale motorului arderea este mai eficientă, rezultând concentrații mai mari de  $\text{CO}_2$ , [88].

## CAPITOLUL 3

### REZULTATE ALE INVESTIGAȚIILOR EXPERIMENTALE

#### 3.1 Descrierea standului de încercări, echipamentelor și procedurii de efectuare a investigațiilor experimentale

Un stand experimental de încercări ale motorului cu ardere internă este foarte complex, compus sisteme și subsisteme ce interacționează între ele pentru a cerceta fenomenele dorite. Implică traductoare și senzori plasați strategic astfel încât să se poată măsura anumiți parametri ce țin de funcționarea motorului. Semnalele date de traductoare trebuie preluate de sisteme de achiziție de date și stocate pentru prelucrări și interpretări ulterioare. Actuatorii și elemente de execuție sunt utilizați pentru a modifica anumiți parametri funcționali ai motorului.

Standul de încercări utilizat de autor este format dintr-o mașină de forță, un motor cu aprindere prin scânteie Daewoo Cielo A15MF cuplat la o frână electrică cu curenți turbionari AVL Dynoperform 160 printr-un cuplaj. Motorul a fost supraalimentat cu o turbosuflantă, principalele caracteristici constructive fiind prezentate în Tabelul 3.1. Momentul de frânare este controlat dintr-un panou de control (PCF). În timpul funcționării frâna se încălzește și este prevăzută cu un sistem de răcire astfel încât aceasta să funcționeze în parametrii optimi. Motorul cu ardere internă este de asemenea prevăzută de un sistem de răcire deschis cu lichid. Standul este prevăzută cu un ventilator antrenat de un motor electric pentru răcirea suplimentară a motorului. Cantitatea de aer admisă în motor este controlată de clapeta de accelerație reglată de un actuator, debitul de aer fiind măsurat cu un debitmetru montat pe traseul de admisie al aerului. Debitul de combustibil este măsurat cu un debitmetru masic montat pe traseul circuitului de alimentare cu combustibil. Presiunea din cilindru este măsurată cu un traductor piezoelectric, semnalul dat de acesta fiind amplificat de un amplificator de sarcini și transmis către un sistem de achiziție de date. Presiunea de supraalimentare a motorului este citită cu ajutorul unui manometru. Gazele de evacuare trec printr-un convertor catalitic și apoi măsurate de un analizor de gaze. Analizorul de gaze măsoară de asemenea și coeficientul de exces de aer. Există mai multe unități de control electronic (ECU) pentru a gestiona funcționarea în parametrii optimi a motorului și a frânei. Schema standului este prezentată în Fig. 3.1.

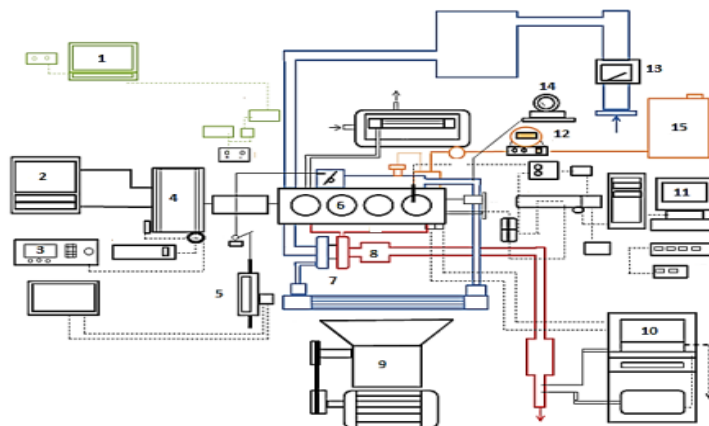


Fig. 3.1 Schema standului, [111]



1 – ECU, 2 – sistem răcire frână, 3 – panou control frână, 4 – frână AVL, 5 – actuator clapetă accelerație, 6 – motor A15MF, 7 – turbosuflantă, 8 – convertor catalitic, 9 – ventilator, 10 – analizor gaze AVL, 11 – calculator desktop, 12 – traductor debit masic combustibil, 13 – traductor debit de aer, 14 – traductor presiune supraalimentare, 15 – rezervor combustibil.

**Tabelul 3.1** Principalele caracteristici ale motorului A15MF

Tip motor	Motor cu aprindere prin scânteie
Număr timpi	4
Număr cilindri	4
Cursă	81,5 mm
Lungime bielă	120 mm
Alezaj	76,5 mm
Raport de comprimare	9,2

Principiul de funcționare al traductoarelor piezoelectrice este următorul: la aplicarea unei presiuni asupra unui material piezoelectric (piezo în limba greacă reprezintă presiune), acesta se deformează mecanic și astfel apar sarcini electrice. Aceste sarcini electrice vor genera un câmp electric, astfel se pot măsura valori de tensiune la suprafața materialului piezoelectric. După ce nu se mai aplică forța de presiune asupra materialului piezo, sarcinile electrice dispar și valoarea tensiunii este nulă. Traductorul de presiune utilizat pe stand este piezoelectric, de tip AVL GU 13Z-24, montat în chiulasa motorului. Semnalul generat de acesta este amplificat de un amplificator de sarcina AVL 3067 A.

Momentul motor, care este astfel aplicat statorului, este măsurat utilizând mărci tensometrice. Un traductor de turație este utilizat pentru a măsura turația. Utilizând aceste mărimi, se poate calcula puterea motorului cuplat la frână. Frâna generează căldură disipată printr-un sistem de răcire cu apă, apa trecând prin inelele statorului.

Analizorul de gaze utilizat este tip AVL DiCom Analyzer 4000. Modelele din seria 4000 au un concept modular oferind astfel flexibilitate mare, posibilitate de montare ușoară și utilizare ușoară. Analizatorul oferă performanțe ridicate, măsurători precise și mentenanță ușoară. Acesta măsoară emisiile de CO, CO<sub>2</sub> și HC prin spectroscopie în infraroșu în timp ce O<sub>2</sub> și NO<sub>x</sub> sunt măsurate prin chimiluminescență. Spectrul infraroșu al probei este colectat prin trecerea unui fascicul de lumina infraroșu prin probă. Examinarea luminii transmise indică mărirea energiei absorbită pentru fiecare lungime de undă. Metoda de analiza prin chimiluminescență se bazează pe principiul prin care oxidul de azot (NO) reacționează cu ozonul (O<sub>3</sub>) de unde rezultă dioxid de azot (NO<sub>2</sub>), 10% dioxid de azot excitat electronic (NO<sub>2</sub><sup>\*</sup>) și oxigen. La reacția chimică dintre oxidul de azot și ozon NO + O<sub>3</sub>, moleculele de NO<sub>2</sub><sup>\*</sup> excitate revin la NO<sub>2</sub>. Acest proces are loc cu emisii de lumină direct proporționale cu concentrația de NO prezentă în gazul de analizat.

Consumul orar de combustibil este măsurat cu debitmetrul masic Krohne Optimass 3050 C.

Pentru a determina debitul de aer trebuie determinată presiunea diferențială din traseul de admisie. Presiunea a fost măsurată printr-un manometru cu lichid.

Procedură de lucru: Regimul de funcționare a motorului utilizat: 55% sarcină, 2500 rot/min turație. Au fost mășurați următorii parametri: momentul, puterea și turația motorului, temperatura și presiunea din incinta laboratorului, temperatura aerului admis în motor, temperatura lichidului

de răcire, presiunea din cilindru corelată cu unghiul de rotație arbore cotit, debitele de aer și combustibil,  $\lambda$  și concentrațiile emisiilor motorului după catalizator. Calitatea amestecului aer-combustibil este modificată de la sărac la bogat și invers, prin modificarea cantității de combustibil injectat. Sunt achiziționate 250 cicluri motor consecutive astfel încât să se determine coeficientul de variabilitate pentru mai mulți parametri precum presiunea maximă din cilindru și presiunea medie indicată.

După realizarea referinței la alimentarea motorului cu benzină, aceleași măsurători în aceleași condiții de funcționare a motorului au fost efectuate la alimentarea cu amestecuri de butanol-benzină, (10% și 15% butanol în amestec).

## **3.2 Rezultate ale investigațiilor experimentale motorului alimentat cu amestec 10% butanol-benzină**

### **3.2.1 Amestecuri bogate**

Diagramele indicate înregistrare la alimentarea cu benzină respectiv amestec 10% butanol-benzină. Din diagramele prezentate se observă următoarele aspecte: 1) variabilitate ciclică mai mare pentru benzină, 2) presiune maximă mai mare pentru 10% butanol-benzină, 3) deplasarea arderii în destindere în cazul amestecului 10% butanol-benzină. Aceste rezultate sunt înregistrare pentru același reglaj al motorului alimentat cu cei doi combustibili, [111]. Mediind rezultatele se obține o presiune maximă mai mare cu aproximativ 5% pentru BB10.

Coeficientul de variabilitate pentru presiunea maximă la alimentarea cu benzină este aproximativ 13% în timp ce la alimentarea cu amestecul 10% butanol-benzină este de 11%. Rezultate similare au fost observate în [112], [113].

Se observă o stabilitate mai bună la alimentarea cu benzină, coeficientul de variabilitate fiind cu 2,5% mai mic. Se pare că adiția de oxigen nu a îmbunătățit stabilitatea arderii la amestecuri bogate. Valoarea medie a presiunii medii indicate este de 9,94 bar pentru benzină și 8,82 bar pentru BB10, o scădere de 12% pentru amestec. Această scădere a presiunii medii indicate poate fi explicată de valoarea mai mică a puterii calorice a amestecului BB10 (butanolul are puterea calorică mai mică decât benzina).

Se observă o mărire a vitezei de creștere a presiunii la alimentarea cu BB10 precum și deplasarea valorii maxime către PMI. Această deplasare a vitezei maxime de creștere a presiunii poate fi explicată de arderea mai rapidă a butanolului în faza arderii rapide, datorită vitezei sale de ardere mai mare, ceea ce explică și creșterea presiunii maxime.

În cazul degajării a 5% din căldură se observă o dispersie mare la alimentarea cu amestecul 10% benzină-butanol. În cazul benzinei  $COV_B = 9,13\%$  iar  $COV_{BB10} = 12,81\%$ . Se poate trage concluzia că adiția de oxigen de butanol nu ajută la îmbunătățirea fazei arderii inițiale la amestecuri bogate. De asemenea se observă că unghiul la care se degaja 5% din căldură este în medie mai mic comparativ cu benzina, indicând o ardere inițială mai rapidă a amestecului 10% benzină-butanol. Rezultate similare au fost obținute de Swaja unde se observă o scădere liniară a unghiului la care se degaja 10% din căldura totală odată cu creșterea procentajului de butanol, [83].

În cazul fazei principale a arderii acest aspect nu mai este valabil. Dispersia ciclică este mai mică în cazul amestecului 10% butanol-benzină, valoarea  $COV_{BB10} \cong 10,5\%$  iar în cazul benzinei  $COV_B = 16,5\%$ . Se observă în acest caz că benzina arde mai rapid ca butanolul, fenomen observat

și de [89]. Unghiul mediu la care se degajă 50% din căldura totală este mai mic la alimentarea cu benzină, un rezultat diferit comparativ cu [83]. De menționat că autorii au utilizat amestecuri de butanol în procentaje mai mari, procentajul minim fiind de 20%.

În cazul arderii finale, (90% din căldura totală) benzina arde un pic mai rapid decât amestecul 10% butanol-benzină. Valorile de dispersie ciclică sunt reduse în ambele cazuri,  $COV=0,5\%$ .

Concluzia este că amestecul 10% butanol-benzină are o influență mică asupra fazei arderii inițiale, influențe mari asupra fazei arderii principale și fără impact major asupra fazei arderii finale. Coeficientul de variație pentru faza arderii principale a fost redus cu 6% prin adăugarea de butanol. Comparând rezultatele obținute cu [56], faza inițială a arderii este mai rapidă la alimentarea cu alcoolii ca și în acest caz, iar coeficientul de variabilitate al presiunii medii indicate la alimentarea cu amestecuri butanol-benzină nu a depășit 8%. Acest aspect este valabil și în rezultatele obținute în această lucrare (5,36%).

În faza principală a arderii benzina arde mai rapid însă valoarea maximă este similară în ambele cazuri de aproximativ  $50 J/^{\circ}RAC$ . Szwaja și colab. au observat de asemenea că la procentaje mai mari de butanol poate varia viteza de degajare a căldurii, însă valoarea maximă este similară cu cea a benzinei, [83].

### 3.2.2 Amestecuri sărace

Valorile maxime sunt mai mici comparativ cu cele obținute la amestecuri bogate. Din punctul de vedere al coeficientului de variație a presiunii maxime, adăugarea de oxigen a butanolului nu aduce o îmbunătățire semnificativă ( $COV_B=11,32\%$  iar  $COV_{BB10}=11,16\%$ ). Presiunea maximă scade cu aproximativ 4,75% la alimentarea cu BB10. Această scădere poate fi cauzată de puterea calorică inferioară mai mică a butanolului și sărăcirea suplimentară a amestecului prin adăugarea de oxigen de butanolului. Rezultate similare au fost observate în [88].

Spre deosebire de amestecuri bogate, presiunea medie indicată este similară la alimentarea cu ambii combustibili iar valoarea medie a acesteia se situează în jur de 8,5 bar. Coeficienții de variație calculați sunt  $COV_B=3,75\%$  și  $COV_{BB10}=3,5\%$ . Se observă o îmbunătățire a stabilității arderii prin adăugarea de oxigen la amestecuri sărace. Rezultate similare au fost observate și în [83].

Se observă o evoluție similară a creșterii de presiuni în timpul arderii pentru ambii combustibili până pe la aproximativ  $380^{\circ}RAC$ , unde la alimentarea cu benzină apare o creștere bruscă a presiunii. O posibilă explicație ar fi avansul la declanșarea scânteii electrice optimizat pentru alimentarea cu benzină.

Valoarea medie a acestui unghi este de  $36,5^{\circ}RAC$  pentru benzină și  $37,4^{\circ}RAC$  la alimentarea cu 10% butanol-benzină. La amestecuri bogate presiunea maximă se obține mai aproape de PMI la alimentarea cu BB10, dar la amestecuri sărace se observă că adăugarea de oxigen nu are o influență majoră asupra unghiului la care se obține presiunea maximă comparativ cu benzina.

Se observă că butanolul arde mai rapid ca benzina în faza arderii inițiale, unghiul mediu fiind  $12^{\circ}RAC$  pentru BB10 și  $15^{\circ}RAC$  pentru benzină. Benzina este mai stabilă din acest punct de vedere însă, cu un  $COV_B=12,81\%$  comparativ cu  $COV_{BB10}=13,55\%$ .

De data aceasta nu se observă o diferență foarte mare între cei doi combustibili, unghiul mediu de degajare a 50% din căldură fiind aproximativ  $31^{\circ}RAC$  în ambele cazuri. Din punctul de vedere al variabilității, butanolul prezintă o reducere semnificativă a coeficientului de variabilitate,

cu aproximativ 6% comparativ cu benzina. Se poate afirma că faza arderii principale este mai stabilă la alimentarea cu BB10.

Se poate observa că arderea se termină mai rapid la alimentarea cu BB10, la un unghi mediu de  $48^{\circ}\text{RAC}$  comparativ cu  $52^{\circ}\text{RAC}$  pentru benzină. La amestecuri sărace se observă tendința butanolului de a arde mai rapid în fazele inițiale și finale ale arderii. Din punct de vedere al COV-ului, la 90% nu se observă o diferență între B și BB10.

Se observă o viteză de degajare a căldurii mai mare la alimentarea cu BB10 la începutul arderii. Acest fenomen poate fi explicat prin viteza mai mare de ardere a butanolului. Viteza maximă de degajare a căldurii este similară la alimentarea cu ambii combustibili (aproximativ  $45 \text{ J}/^{\circ}\text{RAC}$ ).

### **3.3 Rezultate ale investigațiilor experimentale motorului alimentat cu amestec 15% butanol-benzină**

#### **3.3.1 Amestecuri bogate**

Nu se observă nici o modificare semnificativă la alimentarea cu amestecul 15% butanol-benzină,  $(\text{COV})_{\text{PmaxB}} = 9,59\%$  respectiv amestec 15% butanol-benzină  $(\text{COV})_{\text{PmaxBB15}} = 9,54\%$ . Adiția de oxigen a butanolului nu are impact asupra stabilității funcționării motorului la amestecuri bogate și asupra diagramelor indicate. Diagramele indicate se suprapun aproape perfect în ambele cazuri. Presiunea maximă în ambele cazuri este în jur de 38 bar. Rezultate similare au fost obținute în [114], [115].

Coeficientul de variabilitate este redus ca procent, COV-ul pentru benzină fiind de 3,74% iar pentru amestecul 15% butanol-benzină de 3,29%. Diferența procentuală este de 12,8% în favoarea amestecului 15% butanol-benzină. Valoarea medie a presiunii indicate este similară în ambele cazuri, 9,81 bar pentru benzină VS 9,92 bar pentru 15% butanol-benzină.

Se observă o mărire mai mare a vitezei de creștere a presiunii la alimentarea cu benzină, dar pe anumite cicluri motor se obțin valori similare și în cazul amestecului de 15% butanol-benzină. O explicație posibilă ar fi puterea calorică inferioară mai mare a benzinei precum și menținerea reglajelor motorului optimizate la alimentarea cu benzină.

Procentul de butanol nu influențează viteză de degajare a căldurii, valoarea maximă medie fiind în jur de 60 J pe rotație arbore cotit

Coeficientul de variabilitate pentru degajare a 5% din căldură este de 9,13% în cazul benzinei și 13,87% pentru amestecul 15% butanol-benzină (cu aproximativ 5 procente mai mare). Valoarea medie a unghiului la care se degajă 5% din căldură este de aproximativ  $18^{\circ}\text{RAC}$  pentru benzină și  $13^{\circ}\text{RAC}$  pentru 15% butanol-benzină, datorită vitezei mai mari de ardere a butanolului.

Pentru a degaja 50% din căldură, unghiul mediu obținut la alimentarea cu benzină este de  $23^{\circ}\text{RAC}$  și  $29^{\circ}\text{RAC}$  pentru amestecul 15% butanol-benzină, indicând o inversare a trendului comparativ cu 5% căldură degajată. În acest caz, coeficientul de variație are o scădere cu aproximativ 47% (de la 16,52% la 10,24%) la alimentarea cu amestecul 15% butanol-benzină, indicând o îmbunătățire a stabilității procesului de ardere la degajarea a 50% din căldură. La 90% căldură degajată, ambii combustibili au un coeficient de variație redus, sub 0,5% în avantaj fiind benzină în acest caz. Unghiul mediu este de aproximativ  $44^{\circ}\text{RAC}$  în cazul benzinei și  $50^{\circ}\text{RAC}$  în

cazul 15% butanol-benzină, arderea deplasându-se în destindere. Aceste valori se pot îmbunătăți prin optimizarea reglajelor motorului la alimentarea cu amestecul 15% butanol-benzină.

### 3.3.2 Amestecuri sărace

Se observă valori în jur de 15% ale coeficientului de variabilitate al presiunii maxime pentru ambii combustibili. Se observă valori mai mari ale coeficienților de variabilitate atât la alimentarea cu benzină cât și cu amestecul 15% butanol-benzină. Se observă o ușoară creștere a COV-ului (2,7%) la alimentarea cu amestecul 15% butanol-benzină și o scădere cu aproximativ 4,5% a presiunii maxime. Rezultate similare au fost observate în [114], [115].

S-a obținut un COV de aproximativ 6,75% pentru benzină și unul de 7% pentru amestecul 15% butanol-benzină pentru presiunea medie indicată, o creștere de aproximativ 7,4%. Se observă o instabilitate generală la amestecuri foarte sărace, atât la alimentarea cu benzină cât și cu 15% butanol-benzină. Se pot obține îmbunătățiri prin optimizarea reglajelor motorului la utilizarea butanolului. Valoarea medie a presiunii medii indicate este în jur de 8,9 bar pentru benzină și 8,5 bar pentru BB15. Performanțele motorului nu sunt afectate semnificativ de adăugarea de 15% vol. butanol în benzină chiar dacă acesta are un grad mai mare de instabilitate în funcționare, cel puțin la amestecuri foarte sărace.

Ambii combustibili manifestă o mărire mai lentă a vitezei de creștere a presiunii în timpul arderii la amestecuri sărace având valori maxime inferioare (1 respectiv 0,9 bar/°RAC).

Se observă o scădere mică a vitezei maxime de degajare a căldurii la alimentarea cu amestecul 15% butanol-benzină. Această scădere poate fi explicată prin puterea calorică inferioară mai mică a butanolului și sărăcirea suplimentară a amestecului provocată de adăugarea suplimentară de oxigen a butanolului.

Coeficientul de variație are valori ridicate la alimentarea cu ambii combustibili la amestecuri sărace. COV-ul la degajarea a 5% căldură este mai mare la alimentarea cu amestecul de 15% butanol-benzină comparativ cu benzina ( $COV_B = 25,23\%$  VS  $COV_{BB15} = 25,89\%$ ). Astfel se obține un unghi mediu  $\alpha_{5\%}$  de 12 °RAC pentru benzină și 11 °RAC pentru 15% butanol-benzină. Se observă o ardere inițială mai rapidă la amestecuri sărace comparativ cu amestecuri bogate unde unghiul mediu ar fi de 18 °RAC pentru benzină și 13 °RAC pentru 15% butanol-benzină. Aceste valori ridicate ale coeficienților de variabilitate se păstrează și la degajarea de 50% respectiv 90% din căldură la amestecuri sărace. Procesul de ardere nu este la fel de stabil ca la amestecuri bogate. La degajarea a 50% căldură, COV-ul pentru benzină este 16,66% față de 17,83% pentru 15% butanol-benzină cu un unghi mediu de 54°RAC. La 90% căldură degajată, COV-ul benzinei este de 0,77%, respectiv 0,81% pentru 15% butanol-benzină.

### 3.4 Consumul specific energetic și randamentul termic

Cel mai mare consum specific este obținut la alimentarea cu BB15 iar cel mai mic la alimentarea cu benzină, diferența fiind de 37%. În cazul BB10, consumul energetic este cu 5,7% mai mare față de benzină. Consumul energetic mai mare în cazurile BB10 și BB15 poate fi explicat de randamentul termic mai mic la amestecuri bogate. Rezultate similare au fost obținute și în [25], [88] și [90].

Randamentul termic este cu aproximativ 12,5% mai bun la alimentarea cu benzină în comparație cu BB15 la amestecuri bogate. Se observă însă că la amestecuri sărace și foarte sărace randamentul termic este mai mare în cazul BB10 și BB15, de exemplu, BB15 are un randament cu 4,25% mai bun față de benzină. Pentru a beneficia de un randament termic îmbunătățit, se recomandă utilizarea amestecurilor de butanol-benzină la amestecuri sărace  $\lambda=1,3$ . La procentaje mai mari de butanol în amestec se resimte influența puterii calorifice inferioară mai mică a acestuia și astfel este nevoie de un consum energetic mai mare pentru a genera aceeași putere. Prezența butanolului în camera de ardere poate îmbunătăți viteza de ardere, oxidarea fiind completă datorită oxigenului suplimentar din camera de ardere, [90], [95].

### 3.5 Concentrațiile emisiilor poluante

Amestecul BB10 generează cea mai mică concentrație de monoxid de carbon la amestecuri bogate, cu 22% mai puțin decât BB15 și cu 11% mai puțin decât benzina. La amestecuri sărace și foarte sărace nu se observă îmbunătățiri aduse de adiția de oxigen. Oxigenul suplimentar din camera de ardere precum și conținutul de carbon redus al amestecurilor de butanol-butanol îmbunătățesc arderea din cilindru, contribuind la scăderea concentrațiilor de CO. Rezultate similare au fost obținute în [49], [91], [92], [114], [115].

Hidrocarburile nearse sunt de asemenea un produs al arderii incomplete, ineficiente cauzată de lipsa de oxigen din cilindru, a stingerii flăcării la peretele cilindrului. Temperatura scăzută a peretelui cilindrului poate duce la întreruperea reacțiilor chimice și la formarea hidrocarburilor nearse în zona stratului limită al peretelui. Alte surse de formare a hidrocarburilor nearse pot fi ciclurile motor cu aprinderi eșuate (rateuri), dar, o parte din aceste gaze se aprind în sistemul de evacuare în prezența oxigenului. La amestecuri bogate se obțin concentrații de HC cu 10% mai mici la alimentarea cu BB10 comparativ cu benzina iar la amestecuri sărace la alimentarea cu BB10 și BB15 concentrațiile de HC sunt cu 26% mai mici. La amestecuri foarte sărace rezultatele sunt similare în toate cele trei cazuri. Rezultate similare au fost obținute și în [114], [115]. Este posibil ca la turajii și sarcini mari arderea să se înrăutățească și astfel să crească din nou concentrațiile de HC, [88].

Viteza de reacție depinde de temperatură, astfel în cilindru apar zone cu diferite concentrații de oxizi de azot în urma frontului de flacără datorită neomogenității termice. În general, cea mai mare concentrație de oxizi de azot se găsește în zona bujiei acolo unde temperatura este cea mai ridicată. Se observă o reducere a oxizilor de azot la alimentarea cu amestecuri de butanol-benzină atât la amestecuri bogate și sărace. La amestecuri sărace se observă o reducere a concentrațiilor de oxizi de azot cu aproximativ 66% și cu 52% la amestecuri bogate. La amestec stoichiometric BB10 are concentrații de oxizi de azot mai mici cu aproximativ 72%. BB15 are concentrații cu aproximativ 42% mai mici. Acest fenomen poate fi explicat de vaporizarea butanolului care produce un efect de răcire a gazelor și de o temperatură mai mică a flăcării din cilindru. Rezultate similare au fost obținute în [34], [114], [115]. Rezultate diferă însă de cele obținute de Huynh și colab., [88]. Aceștia au obținut concentrații mai mari ale oxizilor de azot odată cu creșterea procentajului de butanol. Autorii concluzionează că ar fi necesare mai multe studii legate de reducerea concentrației emisiilor de  $\text{NO}_x$  la alimentarea cu butanol.

Spre deosebire de monoxidul de carbon și hidrocarburile nearse, dioxidul de carbon este rezultatul unei arderi complete. Arderea hidrocarburilor în prezența unei cantități suficiente de

oxigen va genera dioxid de carbon și apă ca produs de reacție. La amestecuri bogate se observă că BB10 are concentrații de dioxid de carbon cu 23% mai mari comparativ cu BB15 și cu 11% mai mari comparativ cu benzina. Nu se observă diferențe majore între cei trei combustibili la amestecuri sărace și foarte sărace.

## CAPITOLUL 4

### MODELAREA PROCESELOR TERMO-GAZODINAMICE DIN CILINDRUL MOTORULUI CU APRINDERE PRIN SCÂNTEIE

#### 4.1 Noțiuni introductive

Simularea unui fenomen (fie unul simplu precum o forță ce acționează asupra unui corp sau un sistem complex precum o cutie de viteze) necesită în prima fază înțelegerea fenomenului/sistemului, a legăturii dintre diferite subansambluri, determinarea formulelor matematice ce descriu funcționarea acestuia, apoi modelarea urmată de validarea prin experimente fizice. În general primele modele rezultate nu vor produce rezultate credibile întrucât un sistem depinde de foarte multe variabile și stări (unele din acestea nu pot fi exprimate concret spre exemplu unele randamente și astfel vor fi estimate); prin urmare trebuie dezvoltate, simulate numeric, analiza rezultatelor obținute, corectate și adaptate corespunzător astfel încât rezultatele să reflecte realitatea cât mai mult.

Modelul fizico-matematic este construit în jurul ecuațiilor de bilanț energetic ale fiecărui proces termodinamic din cilindru motorului

Din fericire, prin utilizarea unor aplicații de simulare numerică precum AMESim putem reduce semnificativ din dificultățile menționate anterior deoarece acesta dispune deja de modele predefinite și validate. De exemplu, pentru modelarea fenomenelor fizico-matematice din această lucrare s-a plecat de la un model predefinit în librăriile AMESim de motor cu aprindere prin scânteie, `AME/demo/Libraries/CFD1D/SI_SingleCylinder_WInj.ame`, [117]. Modelul este format dintr-un singur cilindru iar cilindreea se calculează dinamic în funcție de principalii parametrii constructivi ai motorului.

Scopul acestui capitol este de a modela procesele termo-gazodinamice din cilindru unui motor standard cu aprindere prin scânteie (MAS) pentru a determina performanțele energetice ale acestuia și influența combustibilului utilizat. În primă fază, rezultatele obținute vor fi comparate cu cele ale investigațiilor experimentale ale motorului de Cielo Nubira, cu o cilindree de 1,5 l alimentat cu benzină. Un model similar a fost utilizat în [116]. Principala limitare a aceluși model este faptul că poate genera rezultate doar la amestecuri stoichiometrice.

#### 4.2 Descrierea modelului din AMESim

Modelul de la care se pleacă este format din următoarele subansambluri: clapetă de accelerație, injector, grupul piston-bielă, arbore cotit și cilindru motorului. Modelul este reprezentat în Fig. 4.1.

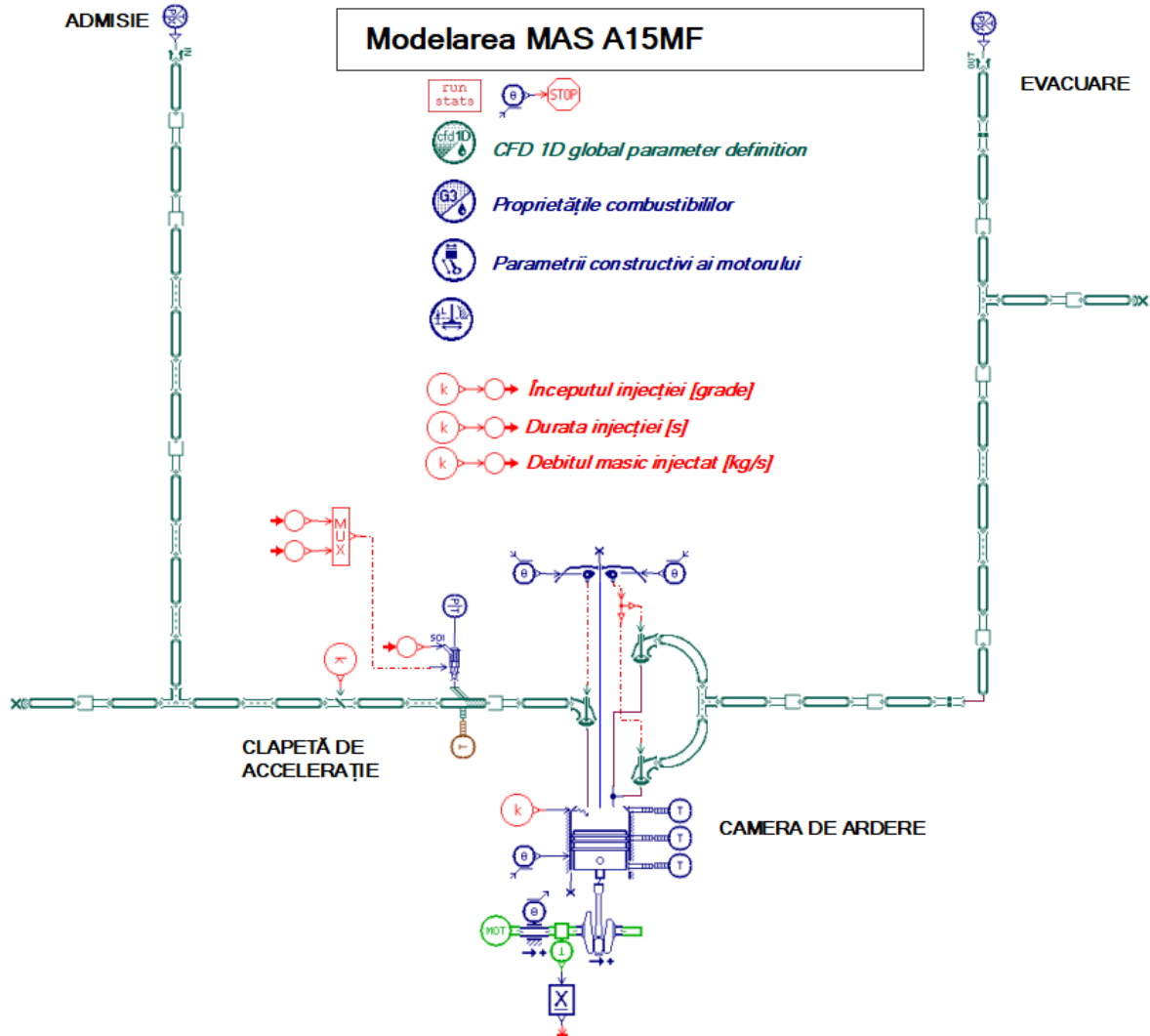


Fig. 4.1 Modelarea motorului cu aprindere prin scânteie A15MF în AMESim, [117]

Principalele sub-modele ale sistemului sunt:

- Modelarea clapetei de accelerație (CFD1DJNCTHROTTLE00)
- Modelarea cilindrului și a camerei de ardere (ENGCCSI10)
- Modelarea mecanismului bielă-manivelă (ENGCRKI00)
- Modelarea injectorului (ENGINJ13)

Parametrizarea modelului se face prin următorii parametri:

- Definirea fluidelor utilizate – compoziția chimică, puterea calorică inferioară, densitatea fluidului, căldura latentă de vaporizare la temperatura de referință
- Definirea motorului – alezajul, cursa, lungimea bielei, aria pistonului
- Definirea cilindrului și arderii – avansul la declanșarea scânteii electrice, întârzierea la aprinderea combustibilului, durata arderii, coeficienții cinematici Vibe
- Definirea sarcinii motorului prin clapeta de accelerație
- Definirea turației motorului



## CAPITOLUL 5

### COMPARAȚIE ÎNTRE REZULTATELE OBȚINUTE EXPERIMENTAL ȘI CELE OBȚINUTE PRIN SIMULARE NUMERICĂ

#### 5.1 Amestecuri bogate

Au fost modificate și optimizate următoarele valori în timpul simulării numerice: puterea calorică inferioară, densitatea combustibilului în stare lichidă, căldura specifică a combustibilului în stare lichidă, temperatura de referință pentru căldura latentă de vaporizare a combustibilului.

Compoziția chimică a celor trei combustibili s-a determinat pornind de la compoziția chimică a benzinei utilizată de model  $C_8H_{18}$  și formula n-butanolului  $C_4H_{10}O$ . În funcție de gradul de substituție al butanolului în benzină (procentual) se determină compoziția chimică a amestecului 15% butanol-benzină. Formula chimică a amestecului BB15 ca fiind  $C_{7,4}H_{16,8}O_{0,15}$ .

Presiunea maxima se situează în jur de 37 – 38 bar. Presiunea maximă precum și unghiul la care se obține presiunea maximă obținute prin simulare numerică se suprapun aproape perfect cu rezultatele obținute experimental. Diferențele pot fi explicate de estimarea momentului aprinderii combustibilului, estimarea avansului la declanșarea scânteii electrice, estimarea coeficienților Wiebe precum și durata de injecție a combustibilului. Coeficientul de îmbogățire al amestecului este de 1,1 echivalentul unui coeficient de exces de aer de aproximativ 0,9.

Variația de creștere a presiunii în timpul arderii obținută experimental și prin simulare numerică este similară dar nu se suprapune perfect. Diferențele pot fi explicate de estimarea coeficienților Wiebe utilizați în calculul vitezei de degajare a căldurii. Această tendință se observă atât experimental cât și prin simulare numerică. La procentaje mai mari de butanol în benzină se observă o scădere a vitezei maxime de creștere a presiunii.

Se observă o evoluție similară a variației vitezei de degajare a căldurii, valoarea maximă fiind în jur de 60J/°RAC la alimentarea cu B și BB15, atât experimental cât și prin simulare. Unghiul la care se obține viteza maximă de degajare a căldurii diferă puțin față de rezultatele experimentale, explicația posibilă fiind estimarea momentului aprinderii combustibilului, a avansului la declanșarea scânteii electrice, a duratei arderii, a duratei injecției, a momentului de început al injecției și a coeficienților Wiebe.

#### 5.2 Amestecuri sărace

Presiunea maxima se situează în jur de 33 – 35 bar. Presiunea maximă precum și unghiul la care se obține presiunea maximă obținute prin simulare numerică se suprapun aproape perfect cu rezultatele obținute experimental. Diferențele pot fi explicate de estimarea momentului aprinderii combustibilului, estimarea avansului la declanșarea scânteii electrice, estimarea coeficienților Wiebe precum și durata de injecție a combustibilului. Coeficientul de îmbogățire al amestecului este de 0,78 echivalentul unui coeficient de exces de aer de aproximativ  $\lambda=1,28$ .

Se observă o evoluție similară a vitezei de creștere a presiunii în timpul arderii atât experimental cât și prin rezultatele obținute prin simulare numerică. Se observă o tendință de scădere a vitezei maxime de creștere a presiunii în timpul arderii odată cu creșterea procentajului de butanol.

Variația vitezei de degajare a căldurii nu este identică pentru toți combustibilii utilizați dar se observă că viteza maximă este similară (între 47 – 50 J/°RAC), fenomen observat de asemenea în [83]. Diferențele între rezultatele experimentale și cele rezultate prin simulare numerică ar putea fi explicate de estimarea momentului aprinderii combustibilului, a avansului la declanșarea scânteii electrice, a duratei arderii, a momentului de început al injecției, a duratei injecției și a coeficienților Wiebe.

Per total, rezultatele obținute prin simularea numerică sunt similare cu [116]. Diferența principală dintre cele două modele utilizate este că modelul prezentat în această lucrare poate funcționa la amestecuri sărace și bogate, fiind mult mai aproape de realitate față de model precedent care funcționa doar la amestecuri stoichiometrice.

## **CAPITOLUL 6**

### **CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE, DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE, DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRILOR EFECTUATE**

#### **6.1 Concluzii**

Din analiza rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale obținute pot fi formulate următoarele concluzii:

##### **I. Alimentarea motorului cu amestec 10% butanol-benzină**

1. Creșterea cu 5% a presiunii maxime a gazelor comparativ cu benzina
2. Îmbunătățirea cu 2% a coeficientului de variabilitate a presiunii maxime datorită vitezei mai mari de ardere a butanolului
3. Apropierea unghiului de presiune maximă de PMI (25 °RAC față de 34 °RAC în cazul benzinei) datorită reducerii duratei fazei arderii principale
4. Reducerea presiunii medii indicate cu 12% la utilizarea amestecurilor bogate datorită puterii calorifice mai mică a butanolului comparativ cu benzina
5. Înrăutățirea cu 2,5% a coeficientului de variabilitate a presiunii medii indicate la utilizarea amestecurilor bogate
6. Viteza maximă de degajare a căldurii la alimentarea cu 10% butanol-benzină este similară cu alimentarea cu benzină
7. Reducerea cu aproximativ 5% a presiunii maxime la utilizarea dozajelor sărace datorită puterii calorifice inferioară mai mică a butanolului și sărăcirii suplimentare a amestecului prin adiția de oxigen de butanol
8. Îmbunătățirea coeficientului de variație a presiunii medii indicate la utilizarea dozajelor sărace
9. Influența redusă asupra presiunii medii indicate la utilizarea dozajelor sărace
10. Mărirea vitezei maxime de creștere a presiunii în timpul arderii la utilizarea dozajelor sărace
11. Creșterea stabilității fazei arderii principale, coeficientul de variație fiind cu 6% mai mic la utilizarea dozajelor sărace
12. Reducerea concentrațiilor de CO și HC narse la utilizarea dozajelor sărace datorită conținutului de oxigen suplimentar din camera de ardere și conținutului redus de carbon al amestecului 10% butanol-benzină

13. Scăderea concentrațiilor emisiilor de oxizi de azot cu 10% comparativ cu benzina

## II. Alimentarea motorului cu amestec 15% butanol-benzină

14. Menținerea presiunii maxime a gazelor la același nivel la utilizarea dozajelor bogate
15. Reducerea cu 12,8% a coeficientului de variație al presiunii medii indicate la utilizarea dozajelor bogate
16. Reducerea vitezei maxime de creștere a presiunii în timpul arderii la utilizarea amestecurilor bogate
17. Valoarea medie a unghiului la care se degajă 5% din căldura totală este 13°RAC față de 18°RAC pentru benzina datorită vitezei mai mari de ardere a butanolului
18. Butanolul prezintă o îmbunătățire semnificativă a coeficientului de variabilitate a unghiului la care se degajă 50% din căldura totală cu o valoare de 10,24% față de 16,52% la alimentarea cu benzina la utilizarea amestecurilor bogate
19. Scăderea cu aproximativ 4,5% a presiunii maxime la utilizarea dozajelor sărace
20. Creșterea cu 2,7% a coeficientului de variabilitate al presiunii maxime la utilizarea dozajelor sărace
21. Creșterea coeficientului de variație al presiunii medii indicate la 7,4% pentru BB15 de la 6,75% pentru benzina
22. Reducerea viteza maxime de creștere a presiunii în timpul arderii la utilizarea dozajelor sărace
23. Reducerea vitezei maxime de degajare a căldurii explicată de puterea calorifică mai mică a butanolului și sărăcirea suplimentară a amestecului provocată de adiția suplimentară de oxigen a butanolului
24. Reducerea cu 4,25% a consumului specific energetic la utilizarea dozajelor sărace datorită vitezei mai mari de ardere a butanolului
25. Reducerea concentrațiilor de NO<sub>x</sub> cu 42% datorită reducerii accentuate produsă de vaporizarea butanolului
26. Reducerea concentrațiilor de CO<sub>2</sub> la utilizarea dozajelor sărace datorită vitezei mai mari de ardere a butanolului
27. Modelul utilizat pentru simularea proceselor termo-gazodinamice din cilindrul motorului cu aprindere prin scânteie A15MF a generat rezultate apropiate de cele obținute experimental. Acesta constituie un instrument util și eficient pentru investigarea proceselor termo-gazodinamice din cilindrul motorului cu aprindere prin scânteie alimentat cu butanol în amestec cu benzina în vederea evaluării performanțelor acestuia.

Butanolul poate fi considerat un combustibil alternativ curat și viabil pentru alimentarea motorului cu aprindere prin scânteie în amestec cu benzina. La procentaje mai mari ale butanolului în amestec cu benzina se observă îmbunătățirea performanțelor energetice și de poluare ale motorului. Prin optimizarea reglajelor motorului se pot obține reduceri suplimentare ale emisiilor poluante precum și îmbunătățirea stabilității funcționării motorului. Utilizarea butanolului la alimentarea motoarelor cu aprindere prin scânteie nu necesită schimbări constructive majore ale motorului.

## 6.2 Contribuții personale

Autorul a adus următoarele contribuții personale la conceperea și redactarea tezei de doctorat:

1. Documentarea și actualizarea stadiului actual al cercetării în domeniul utilizării butanolului la alimentarea motoarelor cu aprindere prin scânteie
2. Upgradarea standului pentru investigații experimentale ale motorului alimentat cu butanol
3. Stabilire proceduri de efectuare a investigațiilor experimentale
4. Efectuarea investigațiilor experimentale pe standul încercări motor
5. Procesarea și analiza rezultatelor investigațiilor experimentale
6. Adaptarea și utilizarea unui model numeric existent în AMESim pentru modelarea și simularea proceselor termo-gazodinamice din cilindru motorului cu aprindere prin scânteie alimentat cu butanol în amestec cu benzina
7. Analiza comparativă între rezultatele obținute experimental respectiv cele obținute din simularea numerică și validarea modelului numeric utilizat

### 6.3 Direcții viitoare de cercetare

1. Efectuarea investigațiilor experimentale ale procesului de ardere la toate regimurile de sarcini și turații utilizate în exploatare
2. Alimentarea motorului cu aprindere prin scânteie cu procentaje mai mari de butanol
3. Efectuarea investigațiilor experimentale ale motorului cu aprindere prin scânteie alimentat cu butanol în amestec cu benzina în condiții de cale
4. Optimizarea reglajelor motorului cu aprindere prin scânteie alimentat cu butanol în amestec cu benzina

### 6.4 Diseminarea rezultatelor cercetărilor efectuate

Rezultatele cercetărilor efectuate de autor pe durata elaborării tezei de doctorat au fost publicate în reviste și în volumele unor congrese/conferințe internaționale de prestigiu.

Lucrări publicate în reviste:

1. **Cristian Sandu**, Constantin Pana, Nicolae Negurescu, Gheorghe Lăzăroiu, Alexandru Cernat, Rareș Georgescu și Cristian Nuțu, The Influence of N-Butanol Addition in Gasoline on the Combustion in the Spark Ignition Engine, Volume 15, Issue 18, 2023, <https://doi.org/10.3390/su151814009>, Sustainability 2023

Lucrări publicate în volumele unor congrese/conferințe internaționale:

2. **Cristian Sandu**, Constantin Pană, Nicolae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu și Rareș Georgescu, The study of the spark ignition engine operation at fuelling with n-butanol-gasoline blends, Volume 180, 2020, eISSN: 2267-1242, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018001010>, E3S Web of Conferences 180, 01010 (2020), TE-RE-RD 2020
3. **Cr Sandu**, C Pana, N Negurescu, Al Cernat, D Fuiiorescu, R Georgescu și C Nutu, The study of cyclic variability at a n-butanol spark ignition engine fueled, Volume 997, 2020,

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012132>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 997, ACME 2020

4. **C Sandu**, C Pana, N Negurescu, A Cernat, D Fuiiorescu, R Georgescu și C Nuțu, Theoretical and experimental research of an automotive gasoline engine fuelled with butanol, Volume 1235, 2021, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1235/1/012036>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1235, IMANEE 2021
5. **Cristian Sandu**, Constantin Pană, Niculae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu și Rareș Georgescu, The study on the influence of utilizing n-butanol at fuelling spark ignition engines, Volume 1220, 2021, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1220/1/012004>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1220, AITS 2021
6. **Cr Sandu**, C Pana, N Negurescu, Al Cernat, D Fuiiorescu, R Georgescu and C Nutu, The study of the spark ignition engine performance at fueling with n-butanol-gasoline mixture, Volume 1262, 2022, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1262/1/012073>, OP Conference Series: Materials Science and Engineering 1262, ACME 2022
7. Rareș Georgescu, Constantin Pană, Niculae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu, **Cristian Sandu**, A study on the influence of utilizing hydrogen at fuelling spark ignition engines, International Congress of SIAR of Automotive and Transport Engineering, EAEC-MVT 2022 26-28 october 2022, Timișoara, Romania
8. Rareș Georgescu, Constantin Pană, Niculae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu, **Cristian Sandu**, Theoretical and experimental research on the use of hydrogen in the automotive spark ignition engine, XXIIIrd National Conference on Thermodynamics with International Participation, NACOT 2023 11-13 may 2023, Galați, Romania, IOP Publishing IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering 1290 (2023)012010 doi:10.1088/1757-899X/1290/1/012010
9. Rareș Georgescu, Constantin Pană, Niculae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu, **Cristian Sandu**, Aspects of the combustion variability analysis at an automotive engine fuelled with hydrogen, The 33rd SIAR International Automotive and Transport Engineering Congress, ESFA 2023, 2-4 November 2023 Bucharest, Romania

## CONTRACTE ȘI RAPOARTE ȘTIINȚIFICE (P, F)

**P - Proiecte de cercetare-dezvoltare- inovare obținute prin competiție, pe bază de contract/grant, în țară / străinătate (Pn - naționale, Pi - internaționale):**

### **Pn - naționale:**

**Pn.1.** Membru în echipa de lucru în proiectul de cercetare: Proiect Experimental Demonstrativ PED 721/2022 - „Utilizarea hidrogenului-soluție viabilă pentru ecologizarea motorului cu ardere internă de automobil”, acronim DIESELH2, Programul 2-Creșterea competitivității economiei românești prin cercetare, dezvoltare și inovare- Subprogramul 2.1-Competitivitate prin cercetare, dezvoltare și inovare, grant of the Ministry of Research, Innovation and Digitization, CCCDI-UEFISCDI, proiect number PN-III-P2-2.1-PED-2021-0427, within PNCDI III, nr UEFISCDI 1078/30.06.2022, nr UPB 14837/23.06,2022, cod CRESCDI 220223723, perioada 2022-2024

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] *Chow, J., Kopp, R.J., and Portney, P.R.* (2003). Energy resources and global development. *Science* 302, 1528–1531.
- [2] *Francesco Cherubini, Anders Hammer Strømman*, Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges, *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 2, 2011, Pages 437-451, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.010>.
- [3] *Lee, S.K. Chou, H. Ham, T.S. Lee, T.S. Keasling, J.D.* Metabolic engineering of microorganisms for biofuels production: From bugs to synthetic biology to fuels. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2008, 19, 556–563.
- [4] *Raud, M. Kikas, T. Sippula, O. Shurpali, N.* Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 111, 44–56.
- [5] *Choi, Y.J. Lee, J. Jang, Y.-S. Lee, S.Y.* Metabolic engineering of microorganisms for the production of higher alcohols. *mBio* 2014, 5, e01524-14.
- [6] *Liao, J.C. Mi, L. Pontrelli, S. Luo, J.C.L.L.M.S.P.S.* Fuelling the future: Microbial engineering for the production of sustainable biofuels. *Nat. Rev. Genet.* 2016, 14, 288–304.
- [7] *Bilal, M. Iqbal, H.M. Hu, H. Wang, W. Zhang, X.* Metabolic engineering and enzyme-mediated processing: A biotechnological venture towards biofuel production—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 82, 436–447.
- [8] *Isikgor, F.H. Becer, C.R.* Lignocellulosic biomass: A sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polym. Chem.* 2015, 6, 4497–4559.
- [13] *Aguado-Deblas L, López-Tenllado FJ, Luna D, Bautista FM, Romero AA, Estevez R.* Advanced Biofuels from ABE (Acetone/Butanol/Ethanol) and Vegetable Oils (Castor or Sunflower Oil) for Using in Triple Blends with Diesel: Evaluation on a Diesel Engine. *Materials.* 2022; 15(18):6493. <https://doi.org/10.3390/ma15186493>
- [14] Directiva (UE) 2018/2001 a Parlamentului European și a Consiliului din data de 11 Decembrie 2018 privind Promovarea utilizării energiei din surse regenerabile. EUR-Lex. Valabilă online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001> (accesată la data de 8.01.2024).

- [15] Departamentul de energie al SUA. Alternative Fuels Data Center: Renewable Fuel Standard. Valabilă online: <https://afdc.energy.gov/laws/RFS> (accesat la data de 8.01.2024).
- [16] *Ming Huo, Han Wu, Karthik Nithyanandan*, „A preliminary Investigation of the Performance and Emissions of a Port-Fuel Injected SI Engine Fueled with Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) and Gasoline”, SAE Technical Papers – Aprilie 2014
- [17] *Veza, I. Said, M.F.M. Latiff, Z.A.* Recent advances in butanol production by acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation. *Biomass Bioenergy* 2021, 144, 105919.
- [18] *Veza, I. Said, M.F.M. Latiff, Z.A.* Progress of acetone-butanol-ethanol (ABE) as biofuel in gasoline and diesel engine: A review. *Fuel Process. Technol.* 2019, 196, 106179.
- [23] *Alasfour FN.*, „NOx emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol–gasoline blend: Part 1. Preheating inlet air. *Appl Therm Eng* 1998”;18(5):245–256
- [24] *Alasfour FN.*, „NOx emission from a spark ignition engine using 30% isobutanol–gasoline blend:Part 2. Ignition timing. *Appl Therm Eng* 1998”;18(8):609–618
- [25] *Dernotte J, Mounaïm-Rousselle C, Halter F, Seers P.* „Evaluation of butanol–gasoline blends in a port fuel-injection, spark-ignition engine.” *Oil Gas Sci Technol* 2009. doi:10.2516/ogst/2009034
- [26] *G. Broustail, P. Seers, F. Halter* „Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends”, Elsevier, Octombrie 2010
- [29] *Regalbuto, C. Pennisi, M. Wigg, B. Kyritsis, D.* Experimental Investigation of Butanol Isomer Combustion in Spark Ignition Engines; SAE Technical Paper; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2012.
- [30] *A. Elfasakhany*, „Performance and emissions assessment of n-butanol–methanol–gasoline blends as a fuel in spark-ignition engines, Elsevier”, 2016, 55(3):3015-3024
- [31] *J.W.G. Turner, R.J. Pearson, E. Dekker, B. Iosefa, K. Johansson, K. Bergstrom*, „Extending the role of alcohols as transport fuels using iso-stoichiometric ternary blends of gasoline, ethanol and methanol”, *Appl. Energy* 102 (2013) 72–86
- [32] *T. Nazzal*, „Experimental study of gasoline–alcohol blends on performance of internal combustion engine”, *Eur. J. Sci. Res.* 52 (2011) 16–22
- [33] *Rodríguez-Antón, L.M. Gutierrez-Martín, F. Doce, Y.* Physical proper-ties of gasoline, isobutanol and ETBE binary blends in comparison with gasoline ethanol blends. *Fuel* 2016, 166, 73–78.
- [34] *D. Balaji, P. Govindarajan, J. Venkatesan*, „Influence of isobutanol blend in spark ignition engine performance operated with gasoline and ethanol”, *International Journal of Engineering Science and Technology* 2(7), 2010
- [35] *L. Sileghem, A. Coppens, B. Casier, J. Vancoillie, S. Verhelst*, „Performance and emissions of iso-stoichiometric ternary GEM blends on a production SI engine”, *Fuel* 117 (2014) 286–293.
- [36] *A. Elfasakhany*, „Investigations on the effects of ethanol– methanol–gasoline blends in a spark-ignition engine: performance and emissions analysis”, *Eng. Sci. Tech. JESTECH* 18 (2015) 713–719
- [37] *A. Elfasakhany*, „Engine performance evaluation and pollutant emissions analysis using ternary ethanol–iso-butanol–gasoline blends in gasoline engines”, *Journal of Cleaner Production*, (2016) 1057-1067
- [38] *A. Elfasakhany*, „Experimental study of dual n-butanol and isobutanol additives on spark-ignition engine performance and emissions”, *Fuel* 163 (2016) 166–174
- [39] *J. Hunter Mack, Daniel Schuler, Ryan H. Butt , Robert W. Dibble*, „Experimental investigation of butanol isomer combustion in Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engines”, *Applied Energy*, Volume 165, 2016, Pages 612-626

- [40] *L. Siwale, L. Kristo' f, A. Bereczky, M. Mbarawa, A. Kolesnikov*, „Performance, combustion and emission characteristics of n-butanol additive in methanol–gasoline blend fired in a naturally aspirated spark ignition engine, *Fuel Process.*”, *Technol.* 118 (2014) 318–326
- [41] *Lark TJ, Hendricks NP, Smith A, Pates N, Spawn-Lee SA, Bougie M, Booth EG, Kucharik CJ, Gibbs HK*. Environmental outcomes of the US Renewable Fuel Standard. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2022 Mar 1;119(9):e2101084119. doi: 10.1073/pnas.2101084119. PMID: 35165202; PMCID: PMC8892349.
- [42] *Lewandrowski J, Rosenfeld J, Pape D, Hendrickson T, Kirsten J & Moffroid K* 2020 The greenhouse gas benefits of corn ethanol – assessing recent evidence *Biofuels* 11 pp 361-375
- [43] *Gautam M., Martin II D.W.* 2000 Combustion characteristics of higher-alcohol/gasoline blends *Proceedings of the IMechE Part A: J. Power and Energy* 214 pp 497-511
- [44] *Gautam M., Martin II D.W., Carder D.* 2000 Emission characteristics of higher-alcohol/gasoline blends *Proceedings of the IMechE Part A: J. Power and Energy* 214 pp 165-182
- [45] *E. Galloni, G. Fontana, S. Staccone, F. Scala*, 2016 Performance analyses of a spark-ignition engine firing with gasoline-butanol blends at partial load operation *Elsevier Energy Conversion and Management* 110 pp 319-326
- [49] *Heywood, John B.* 2018. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education.
- [56] *Serras-Pereira J, Aleiferis P.G, Richardson D.* An Analysis of the Combustion Behavior of Ethanol, Butanol, Iso-Octane, Gasoline, and Methane in a Direct-Injection Spark-Ignition Research Engine. *Combustion Science and Technology* (2013), 185:3, 484-513
- [59] *Yacoub Y., Bata R., Gautam M.* 1998 The performance and emission characteristics of C1-C5 alcohol-gasoline blends with matched oxygen content in a single-cylinder spark-ignition engine *Proceedings of the IMechE Part A: J. Power and Energy* 212 pp 363-379
- [60] *Mcenally, C.S. Pfefferle, L.D.* Fuel decomposition and hydrocarbon growth processes for oxygenated hydrocarbons: Butyl alcohols. *Proc. Combust. Inst.* 2005, 30, 1363–1370.
- [61] *Osswald, P. Gül denberg, H. Kohse-Höinghaus, K. Yang, B. Yuan, T. Qi, F.* Combustion of butanol isomers—A detailed molecular beam mass spectrometry investigation of their flame chemistry. *Combust. Flame* 2011, 158, 2–15.
- [62] *Frassoldati, A. Grana, R. Faravelli, T. Ranzi, E. Osswald, P. Kohse-Höinghaus, K.* Detailed kinetic modeling of the combustion of the four butanol isomers in premixed low-pressure flames. *Combust. Flame* 2012, 159, 2295–2311.
- [63] *Moss, J.D. Berkowitz, A.M. Oehlschlaeger, M.A. Biet, J. Warth, V. Curran, H.J. Battin-Leclerc, F.* An Experimental and Kinetic Modeling Study of the Oxidation of the Four Isomers of Butanol. *J. Phys. Chem. A* 2008, 112, 10843–10855.
- [64] *Valdivia, M. Galan, J.L. Laffarga, J. Ramos, J.* *Biofuels 2020: Biorefineries based on lignocellulosic materials.*
- [65] *Lara-Flores, A.A. Araújo, R.G. Rodríguez-Jasso, R.M. Aguedo, M. Aguilar, C.N. Trajano, H.L. Ruiz, H.A.* Bioeconomy and Biorefinery: Valorization of Hemicellulose from Lignocellulosic Biomass and Potential Use of Avocado Residues as a Promising Resource of Bioproducts; Singhania, R., Agarwal, R., Kumar, R., Sukumaran, R., Eds.; *Waste to Wealth*; Springer: Singapore, 2018; pp. 141–170.
- [66] *Weber, C. Farwick, A. Benisch, F. Brat, D. Dietz, H. Subtil, T. Boles, E.* Trends and challenges in the microbial production of lignocellulosic bioalcohol fuels. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010, 87, 1303–1315.
- [67] *Amoah, J. Kahar, P. Ogino, C. Kondo, A.* Bioenergy and biorefinery: Feedstock, biotechnological conversion, and products. *Biotechnol. J.* 2019, 14, e1800494.



- [68] *Toor, M. Kumar, S.S. Malyan, S.K. Bishnoi, N.R. Mathimani, T. Rajendran, K. Pugazhendhi, A.* An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Chemosphere* 2020, 242, 125080.
- [69] *Wang, B.-W. Shi, A.-Q. Tu, R. Zhang, X.-L. Wang, Q. Bai, F.* Branched-chain higher alcohols. *Process Integr. Biochem. Eng.* 2011, 128, 101–118.
- [70] *Atsumi, S. Hanai, T. Liao, J.C.* Non-fermentative pathways for synthesis of branched-chain higher alcohols as biofuels. *Nat. Cell Biol.* 2008, 451, 86–89.
- [71] *C. A. Srinivasan, C. G. Saravanan,* „Study of combustion characteristics of an SI engine fuelled with ethanol and oxygenated fuel additives”, *JSEE*, vol. 1, 2010, pp. 85-91
- [72] *A.M. Liaquat, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, M.H. Jayed,* „Potential emissions reduction in road transport sector using biofuel in developing countries,” *Atmos. Environ.*, vol. 44, 2010, pp. 3869-3877
- [73] *Ramey, David E., and Yang, Shang-Tian.* Production of Butyric Acid and Butanol from Biomass. United States: N. p., 2005. Web. doi:10.2172/843183
- [74] *C. Somerville,* Biofuels, *Curr. Biol.*, vol. 17, 2007, pp. R115R119.
- [75] *Kaminski, W. & Tomczak, Elwira & Górak, Andrzej.* (2011). Biobutanol - Production and purification methods. *Ecological Chemistry and Engineering S.* 18. 31-37.
- [76] *Hahn, H.-D. Dämbkes, G. Rupprich, N. Bahl, H. Frey, G.D.* Butanols. In *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [77] *D.T. Jones, D. R. Woods,* „Acetone-butanol fermentation revisited”, *Microbiol.Rev.*, vol. 50, 1986, pp. 484-524
- [78] *V.H. Thang, K. Kanda, G. Kobayashi,* „Production of acetonebutanol- ethanol (ABE) in direct fermentation of cassava by *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1–4”, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 161, 2010, pp. 157-170
- [81] *Ceviz M.A., Yuksel F.* (2005) Effects of ethanol–unleaded gasoline blends on cyclic variability and emissions in an SI engine, *Appl. Therm. Eng.* 25, 917-925.
- [82] *D. Richardson and S. Wallace,* „Characteristics of Ethanol, Butanol, Iso-Octane and Gasoline Sprays and Combustion from a Multi-Hole Injector in a DISI Engine”, 2008 SAE International
- [83] *S. Szwaja, J.D. Naber,* Combustion of n-butanol in a spark-ignition IC engine, *Fuel*, Volume 89, Issue 7, 2010, 1573-1582, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.043>.
- [87] *He B.-Q., Wang J.-X., Hao J.-M., Yan X.-G., Xiao J.-H.* (2003) A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels, *Atmos. Environ.* 37, 949-957.
- [88] *Huynh, T.T., Le, M.D. & Duong, D.N.* Effects of butanol–gasoline blends on SI engine performance, fuel consumption, and emission characteristics at partial engine speeds. *Int J Energy Environ Eng* 10, 483–492 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40095-019-0309-9>
- [89] *Szwaja S, Gruca M, Pyrc M, Juknelevičius R.* Performance and Exhaust Emissions of a Spark Ignition Internal Combustion Engine Fed with Butanol–Glycerol Blend. *Energies.* 2021; 14(20):6473. <https://doi.org/10.3390/en14206473>
- [90] *Isam E. Yousif, Adel Mahmoud Saleh,* Butanol-gasoline blends impact on performance and exhaust emissions of a four stroke spark ignition engine, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 41, 2023, 102612, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102612>.
- [93] *Mittal, N., Athony, R.L., Bansal, R., Kumar, C.R.:* Study of performance and emission characteristics of a partially coated LHR SI engine blended with n-butanol and gasoline. *Alex. Eng. J.* 52(3), 285–293 (2013)
- [94] *Yu Li, Jinke Gong, Yuanwang Deng, Wenhua Yuan, Jun Fu, Bin Zhang,* Experimental comparative study on combustion, performance and emissions characteristics of methanol, ethanol and butanol in a spark

- ignition engine, *Applied Thermal Engineering*, Volume 115, 2017, Pages 53-63, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.037>.
- [95] *Manish Saraswat*, Performance and Emission evaluation of Butanol blends in SI Engine, 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 691 012081.
- [104] *R. Feng, J. Yang, D. Zhang, B. Deng, J. Fu, J. Liu, X. Liu*, „Experimental study on SI engine fuelled with butanol–gasoline blend and H<sub>2</sub>O addition, *Energy Convers. Manage.* 74 (2013) 192–200
- [111] **Cristian Sandu**, *Constantin Pană, Niculae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu și Rareș Georgescu*, The study of the spark ignition engine operation at fuelling with n-butanol-gasoline blends, Volume 180, 2020, eISSN: 2267-1242, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018001010>, E3S Web of Conferences 180, 01010 (2020), TE-RE-RD 2020
- [112] **Cr Sandu**, *C Pana, N Negurescu, Al Cernat, D Fuiiorescu, R Georgescu și C Nutu*, The study of cyclic variability at a n-butanol spark ignition engine fueled, Volume 997, 2020, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012132>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 997, ACME 2020
- [113] **Cristian Sandu**, *Constantin Pană, Niculae Negurescu, Alexandru Cernat, Cristian Nuțu și Rareș Georgescu*, The study on the influence of utilizing n-butanol at fuelling spark ignition engines, Volume 1220, 2021, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1220/1/012004>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1220, AITS 2021
- [114] **Cr Sandu**, *C Pana, N Negurescu, Al Cernat, D Fuiiorescu, R Georgescu and C Nutu*, The study of the spark ignition engine performance at fueling with n-butanol-gasoline mixture, Volume 1262, 2022, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1262/1/012073>, OP Conference Series: Materials Science and Engineering 1262, ACME 2022
- [115] **Cristian Sandu**, *Constantin Pana, Niculae Negurescu, Gheorghe Lăzăroiu, Alexandru Cernat, Rareș Georgescu și Cristian Nuțu*, The Influence of N-Butanol Addition in Gasoline on the Combustion in the Spark Ignition Engine, Volume 15, Issue 18, 2023, <https://doi.org/10.3390/su151814009>, Sustainability 2023
- [116] **C Sandu**, *C Pana, N Negurescu, A Cernat, D Fuiiorescu, R Georgescu și C Nuțu*, Theoretical and experimental research of an automotive gasoline engine fuelled with butanol, Volume 1235, 2021, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1235/1/012036>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1235, IMANEE 2021
- [117] \*\*\*Librăriile din aplicația LMS AMESim versiunea 13.0.0 / Rev13 - 35759-31626 2013