



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică



Andreea-Mirela G. TELEAȘĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

(rezumat)

**Contribuții privind analiza
fluidelor hidraulice minerale și
biodegradabile pentru sisteme
industriale**

Conducător științific,
Prof.univ.dr.ing. Sorin CĂNĂNĂU

CUPRINS

Listă de figuri.....	I
Listă de tabele.....	IX
Listă de notații.....	XI
Listă de abrevieri.....	XIII
Cuvinte de mulțumire.....	XV
Introducere.....	1
Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind lubrifianții hidraulici	3
1.1 Generalități cu privire la lubrifianții hidraulici.....	3
1.1.1 Biodegradabilitatea lubrifianților.....	4
1.1.2 Compoziții ale lubrifianților hidraulici.....	5
1.1.3 Proprietățile fluidelor hidraulice.....	7
1.2 Studii experimentale din literatura de specialitate ale lubrifianților hidraulici	9
1.3 Analiza ciclului de viață a uleiurilor hidraulice.....	14
1.3.1 Standardul ISO 14040 cu privire la analiza ciclului de viață.....	14
1.3.2 Etapele ciclului de viață ale uleiurilor hidraulice	16
1.4 Proceduri de testare standardizate pentru caracterizarea fluidelor.....	19
1.5 Obiectivele tezei.....	21
Capitolul 2. Studiul reologic al uleiurilor hidraulice.....	23
2.1 Proprietăți și clasificarea reologică a uleiurilor	23
2.2 Prezentarea echipamentului de testare pentru determinarea proprietăților reologice.....	25
2.2.1 Viscosimetrul Brookfield CAP2000+.....	25
2.2.2 Sistemul de achiziție și prelucrare a datelor.....	29
2.3 Modele reologice.....	31
2.4 Metodologia de testare	33
Capitolul 3. Studiul reologic al uleiurilor hidraulici aflați în stare proaspătă.....	35
3.1 Proprietățile fizico-chimice ale uleiurilor studiate	35
3.2 Analiza reologică a uleiurilor hidraulici aflați în stare proaspătă.....	37
3.2.1 Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic mineral H46.....	37
3.2.2 Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic biodegradabil HETG46.....	42
3.2.3 Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic biodegradabil HF-E46.....	48
3.3 Discuții comparative.....	53
3.4 Concluzii.....	56
Capitolul 4. Studiul reologic al uleiurilor hidraulici degradați termic	59
4.1 Metodologia de degradare termică a uleiurilor hidraulici	59

POLITEHNICA București	Teză de doctorat	Contribuții privind analiza fluidelor hidraulice minerale și biodegradabile pentru sisteme industriale	Andreea-Mirela G. TELEAȘĂ
4.2	<i>Analiza reologică a uleiurilor hidraulice degradați termic</i>	64	
4.2.1	<i>Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic mineral H46</i>	64	
4.2.2	<i>Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic biodegradabil HETG46</i>	70	
4.2.3	<i>Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic biodegradabil HF-E46</i>	78	
4.3	<i>Concluzii</i>	86	
Capitolul 5.	Analiza prin spectroscopie în infraroșu cu transformare Fourier a uleiurilor hidraulice	89	
5.1	<i>Echipamentul pentru analiza spectroscopică</i>	89	
5.2	<i>Rezultatele spectroscopice FTIR aplicate uleiurilor hidraulice</i>	90	
5.2.1	<i>Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic mineral H46</i>	90	
5.2.2	<i>Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic biodegradabil HETG46</i>	94	
5.2.3	<i>Rezultate experimentale pentru uleiul hidraulic biodegradabil HF-E46</i>	99	
5.3	<i>Concluzii</i>	104	
Capitolul 6.	Studiul funcționării standului acționat hidraulic prin testare experimentală	105	
6.1	<i>Introducere</i>	105	
6.2	<i>Prezentarea standului experimental</i>	107	
6.3	<i>Sistemul de achiziție a datelor experimentale</i>	114	
6.4	<i>Metodologie de testare și rezultate experimentale</i>	121	
6.5	<i>Concluzii</i>	127	
Capitolul 7.	Simularea standului experimental în programul Simcenter Amesim	129	
7.1	<i>Prezentarea programului de simulare Simcenter Amesim</i>	129	
7.2	<i>Rezultatele simulării standului în programul Simcenter Amesim</i>	132	
7.3	<i>Analiza comparativă între rezultatele obținute pe standul experimental și cele din simulare</i>	142	
7.4	<i>Concluzii</i>	146	
Capitolul 8.	Concluzii finale. Contribuții personale. Direcții de cercetare viitoare	149	
8.1	<i>Concluzii finale</i>	149	
8.2	<i>Contribuții personale</i>	150	
8.3	<i>Perspectivile lucrării</i>	151	
Bibliografie		153	
Listă de lucrări		161	
ANEXE		163	

CUVINTE CHEIE

Reologie, Ulei hidraulic mineral (H46), Ulei hidraulic biodegradabil (HETG46 și HF-E46), Viscositate, Degradare termică, Spectroscopie FTIR, Presiune, Debit.

REZUMATUL CAPITOLELOR PREZENTATE ÎN TEZA DE DOCTORAT

În Capitolul 1 intitulat “*Stadiul actual al cercetărilor privind lubrifiștii hidraulici*”, sunt prezentate noțiuni generale cu privire la uleiurile hidraulice minerale și biodegradabile utilizate în sistemele acționate hidraulic, impactul acestora asupra mediului și totodată interesul crescut în ceea ce privește studiul performanțelor uleiurilor, cât și înțelegerea comportamentului uleiului în diferite condiții de funcționare.

Fluidele pe bază de uleiuri minerale, deși prezintă proprietăți bune de lubrifiere în aplicațiile industriale, acestea au un impact negativ asupra mediului, cum ar fi contaminarea apei și a solului și emisiile de gaze de seră. Astfel că, a fost luat în considerare implementarea uleiurilor biodegradabile ca înlocuitori ai celor minerali. Prin obținerea și implementarea uleiurilor biodegradabile, pe lângă reducerea impactului asupra mediului, aceștia au un indice de viscozitate și o lubrifiere ridicată, extind durata de viață a echipamentelor și totodată stimulează economia agricolă prin valorificarea resurselor regenerabile [8], [26].

În studiul experimental al lui Majdan et al. [31] a fost evaluat impactul a doua uleiuri hidraulice biodegradabile (HETG-uleiuri vegetale și HEPR-polialfaolefine) prin comparație cu un ulei hidraulic mineral (HV) asupra uzurii pompei hidraulice cu roți dințate, utilizând un banc de testare special cu încărcare prin presiune ciclică. Parametrii evaluați au fost eficiența pompei hidraulice, rugozitatea suprafețelor componentelor interne și pierderile de material ale acestora.

Rezultatele obținute au pus în evidență faptul că pompa atunci când a utilizat uleiurile HEPR și HV a înregistrat cele mai reduse variații ale eficienței, Figura 1.2, și pierderi de material, Figura 1.4, prin comparație cu situația în care a utilizat uleiul biodegradabil HETG. Prin utilizarea uleiului HETG a rezultat un grad de uzură mai ridicat față de celelalte două uleiuri, caracterizat prin pierderi de greutate ale componentelor, valori ridicate ale rugozității lagărelor cu alunecare (Figura 1.3) și scăderea eficienței pompei. Rezultatele privind uzura pompei indică faptul că materialele din care sunt fabricate componentele sunt de înaltă calitate, uzura fiind redusă în toate cazurile. Cu toate că prin utilizarea uleiul biodegradabil au rezultat

valori ale uzurii și a pierderilor de eficiență a pompei mai ridicate comparativ cu celelalte două uleiuri testate, funcționarea pompei nu a fost influențată negativ.

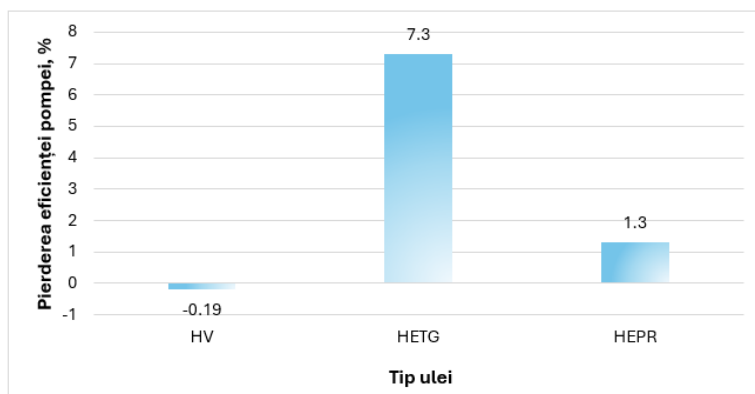


Figura Error! No text of specified style in document..1 Pierdere eficienței pompei hidraulice după testarea cu diferite tipuri de ulei [31]

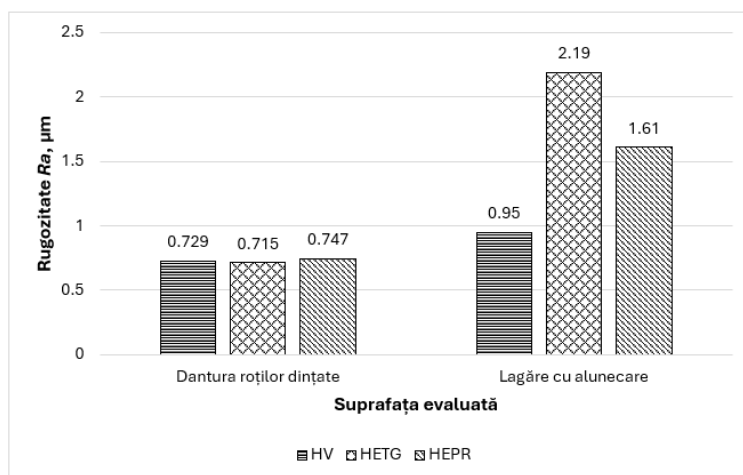
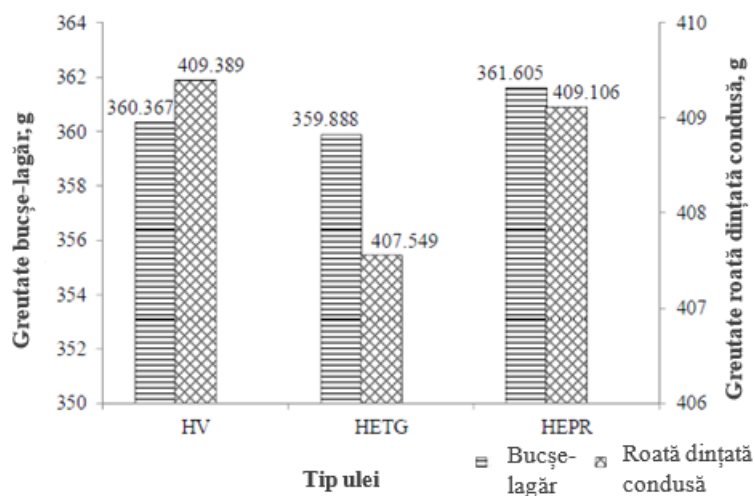


Figura 1.3 Compararea rugozității R_a ale componentelor pompei hidraulice după testarea cu diferite uleiuri [31]



Obiectivele tezei

În ultimii ani, mediul economic este din ce în ce mai solicitat să-și demonstreze angajamentul față de un mediu cât mai curat, mai ales prin prisma raportului de sustenabilitate.

O preocupare majoră este cea de obținere a unor uleiuri hidraulice care să corespundă acestui scop, respectiv alegerea lor corectă pentru funcționarea unor instalații industriale. Nu în ultimul rând, utilizarea uleiurilor hidraulice biodegradabile este absolut necesară a fi evaluată, deoarece acestea pot influența în mod pozitiv performanțele de mediu, sociale și de guvernare.

Astfel, obiectivul general al tezei este acela de a evidenția performanțele sistemelor hidraulice prin utilizarea uleiurilor biodegradabile și compararea acestora cu sistemele clasice care folosesc uleiuri minerale.

Teza are ca scop să atingă următoarele obiective:

- realizarea stadiului actual al cercetărilor în domeniu;
- determinarea parametrilor reologici (viscozitate, indice de consistență și indice de curgere) în ipoteza valabilității modelelor reologice Oswald-de Waele și Newtonian a trei tipuri de uleiuri hidraulice aflate în stare proaspătă, și anume H46 (ulei hidraulic mineral), HETG46 (ulei hidraulic pe bază de uleiuri vegetale), HF-E46 (ulei hidraulic biodegradabil pe bază de ester sintetici proveniți din acizii grași ai uleiurilor vegetale);
- determinarea variației viscozității cu temperatura, utilizând modelul termic Reynolds, care este un model de tip exponențial;
- realizarea unei metodologii de lucru cu privire la efectuarea studiului reologic asupra uleiurilor de testare;
- degradarea termică a uleiurilor studiate și totodată studiul reologic al acestora;
- efectuarea analizei chimice asupra uleiurilor aflate în stare proaspătă și degradate termic, prin spectroscopie în infraroșu cu transformare Fourier și compararea acestora, cu scopul de a identifica noi tipuri de legături chimice în structura acestora;
- realizarea unui stand experimental pentru testarea uleiurilor și determinarea parametrilor hidraulici prin intermediul cărora este posibilă identificarea eficienței sistemului hidraulic;

→ simularea standului experimental prin intermediul programului Simcenter Amesim și compararea rezultatelor cu cele obținute pe standul experimental din cadrul laboratorului.

În teza de doctorat, au fost studiate din categoria fluidelor/lubrifianților hidraulici, uleiurile hidraulice minerale și biodegradabile.

În Capitolul 2 intitulat “*Studiul reologic al uleiurilor hidraulice*” sunt prezentate proprietățile și clasificare reologică ale fluidelor, urmate de prezentarea echipamentului utilizat pentru testarea fluidelor hidraulice împreună cu sistemul de achiziție și prelucrare a datelor, modelele reologice utilizate și de asemenea, metodologia de testare.

Conform [74], proprietățile reologice sunt definite în principal prin *viscozitate* și *elasticitate*. În timp ce *viscozitatea* este specifică materialelor fluide, la care deformarea continuă să crească în timp, fără revenirea la forma inițială după îndepărtarea solicitării, *elasticitatea* este caracteristică materialelor solide, care, odată ce solicitarea externă este înlăturată, își recapătă complet forma inițială. Intervine o a treia proprietate numită *plasticitate*, rezultat al apariției proprietății de viscozitate și elasticitate asupra corpului

Echipamentul de testare utilizat în efectuarea experimentelor, a fost un viscozimetru rotativ de tip Couette, cu geometria con-placă, marca Brookfield CAP2000+, controlat de un software CAPCALC 32 din cadrul departamentului de Organe de Mașini și Tribologie din cadrul POLITEHNICA București, Figura 2.5, iar în Figura 2.6 sunt prezentate elementele componente ale acestuia..



Figura Error! No text of specified style in document..4 Viscosimetrul rotativ de tip Couette, Brookfield CAP2000+

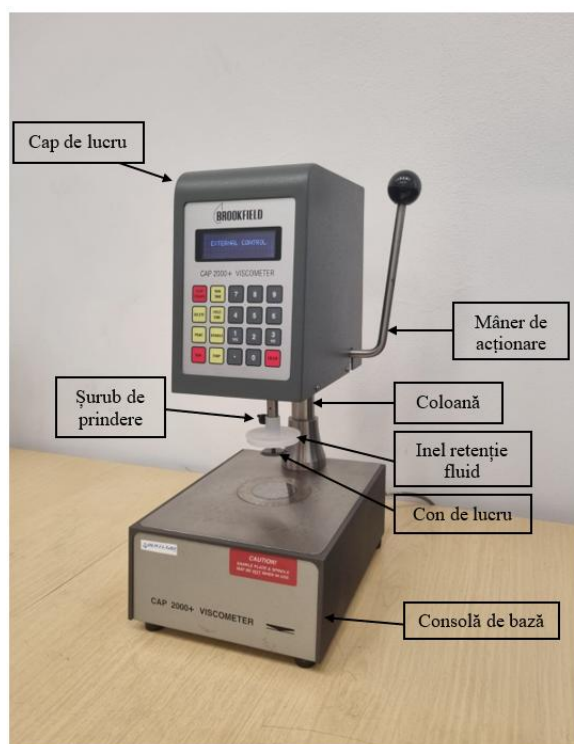


Figura 2.6 Elementele componente ale viscosimetrului

Acest viscosimetru a fost proiectat pentru măsurarea viscozității ce utilizează geometria de tip con-placă ceea ce face posibilă aplicarea unor viteze de forfecare. Geometria viscosimetrului de tip con-placă, prezintă rată de forfecare uniformă și permite de asemenea, măsurarea tensiunii normale. Viscosimetrul cu geometria de tip con-placă este cel mai utilizat dispozitiv pentru determinarea proprietăților reologice a unui fluid newtonian sau nenewtonian. Acesta este format dintre un con și o placă, iar la mijlocul acestora se află fluidul [90].

Viscosimetrul Brookfield CAP2000+ este controlat de un software denumit CAPCALC 32 ("CAPCALC 32 - Brookfield AMETEK" 2018) care permite controlul viscosimetrului de pe un calculator pentru testarea automată, funcția de programare, colectarea și stocarea datelor de testare , prelucrarea numerică a datelor, precum și setarea generală a parametrilor de lucru a viscosimetrului. Modelele matematice încorporate ajută la analiza rapidă și ușoară a comportamentului fluxului de materiale, se pot trasa curbele de curgere/viscozitate, poate să înregistreze până la 1000 de puncte de date per test și creează o înregistrare permanentă a testului în unitățile de măsură cP sau mPa·s, generează până la patru seturi de date simultan în 12 tipuri de diagrame și oferă calcule ale tensiunii de curgere [91].

Conceptul de model reologic reprezintă instrumentul de bază ce caracterizează reologia. Modelul reologic este reprezentat de o relație matematică între tensiuni, deformații sau viteză de deformare și coeficienți de material [78]. Prin interpretarea acestor modele, se poate identifica comportamentul fluidelor, fie că sunt fluide nenenewtoniene dependente sau independente de timp, fie că sunt fluide cu proprietăți de elasticitate sau plasticitate [92].

Programul de testare al uleiurilor a fost realizat prin intermediul programului CAPCAL32 de care dispune viscozimetru. Cu ajutorul acestui sistem de calcul au fost determinați parametrii modelului reologic ale uleiurilor studiate în ipoteza valabilității modelului Oswald-de Waele (Legea puterii), iar parametrii modelului reologic newtonian, au fost determinați prin intermediul programului de calcul Excel.

Uleiurile au fost testate la temperatura constantă de 20°C, într-un interval de gradienti de viteză cuprins între 100 s⁻¹ și 2000 s⁻¹, echivalent cu o turație a conului cuprins între 50-1000 rpm, folosind conul numărul 8, care are o rază a conului de 15,11 mm, unghiul de vârf al conului este de 3°, iar intervalul de măsurare a viscozității fiind cuprins între 0,312...3,12 Pa·s.

Pentru a pune în evidență variația viscozității în funcție de temperatură, a fost utilizat, software-ul CAPCAL32, prin intermediul căruia s-a realizat programul de testare.

Programul de testare a fost proiectat pentru a măsura temperatura în intervalul de 15°C...75°C, la un gradient de viteză constant de 250 s⁻¹, 500 s⁻¹, 750 s⁻¹ respectiv 1000 s⁻¹, cu o turație a conului de 125 rpm, 250 rpm, 375 rpm, respectiv 500 rpm.

Pentru determinarea variației parametrilor reologici cu temperatura, a fost aplicat modelul Reynolds, care este un model termic de tip exponențial. Proba de ulei a fost omogenizată inițial timp de 2 minute, după care timpul de omogenizare a probei pentru fiecare punct măsurat a fost de aproximativ 1 minut (soaking time).

Capitolul 3 intitulat “ *Studiul reologic al uleiurilor hidraulice aflați în stare proaspătă*”, au fost prezentate uleiurile hidraulice studiate și proprietățile acestora conform fișelor tehnice, subcapitol 3.1. În subcapitolul 3.2 au fost evidențiate rezultatele obținute în urma studiului reologic ale acestora aflate în stare proaspătă.

În Figura 3.1 este prezentat aspectul vizual pentru cele trei uleiuri hidraulice utilizate în testele reologice.

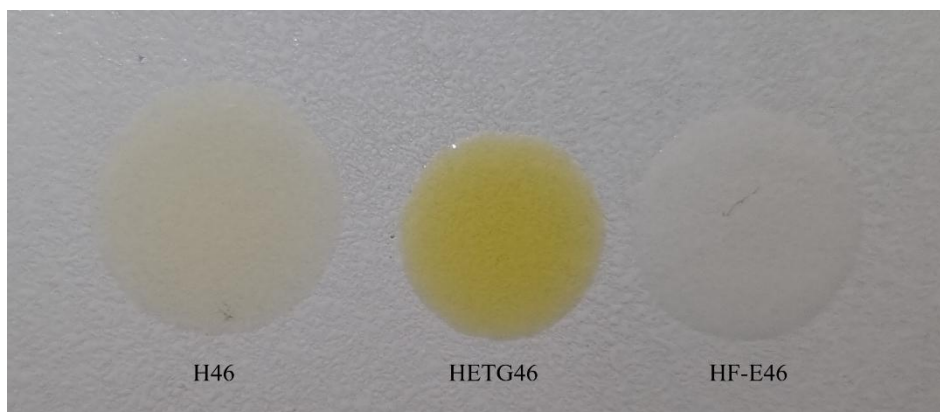


Figura 3.1 Uleiuri hidraulice utilizate în testarea experimentală

În studiul realizat de Olszak et al. [103] sunt evidențiate proprietățile fizico-chimice și tribologice ale uleiurilor hidraulice biodegradabile. În urma rezultatelor obținute, s-a observat faptul că aceste uleiurile hidraulice biodegradabile pot fi considerate alternative ale uleiurilor hidraulice minerale, datorită biodegradabilității ridicate, a toxicității reduse și a proprietăților fizico-chimice favorabile. Aceste proprietăți fizico-chimice fiind evidențiate și în studiul lui Petlyuk et al. [104] și studiul lui Uppar et al. [105].

Această categorie de uleiuri hidraulice biodegradabile prezintă proprietăți fizico-chimice bune, precum toxicitate redusă, biodegradabilitate ridicată, un comportament al viscozității în funcție de temperatură favorabil [35], stabilitate la forfecare, volatilitate redusă și indice de viscozitate ridicat. Cu toate acestea, ele sunt predispuse la oxidare și instabilitate termică în comparație cu uleiurile minerale [27].

În Tabel 3.1 sunt prezentate proprietățile fizico-chimice ale uleiurilor hidraulice utilizate în testarea experimentală.

Tabel 3.1 Proprietățile fizico-chimice ale uleiurilor hidraulice testate [95], [96], [97]

Ulei	H46	HETG46	HF-E46
Proprietăți	ISO 11158	ISO 15380	ISO 15380
Clasa de viscozitate	46	46	46
Densitate relativă la 15°C, max [kg/m ³]	876	918	921
Indice de viscozitate, min.	98	210	188
Viscozitate cinematică la 40°C, [cSt]	44	-	47,2
Viscozitate cinematică la 100°C, [cSt]	6,6	10	9,41
Punct de inflamabilitate, min. [°C]	226	>270	320

Punct de curgere, max. [°C]	-24	-30	-42
Acțiune corozivă pe lama de cupru, 3h, max, 100 [°C]	1A	-	-
Valoarea acidului, [mg KOH/g]	-	0,5	-
Parți materii prime regenerabile, [%]	-	95	76
Temperatura de aprindere [°C]	-	-	>400

În Figura 3.6, Figura 3.13, Figura 3.20 sunt prezentați parametrii modelului reologic legea puterii, obținuți pentru uleiul H46 la temperatura de 20°C, prin regresie aplicată datelor experimentale utilizând software-ul CAPCALC 32, în ipoteza valabilității acestui model.

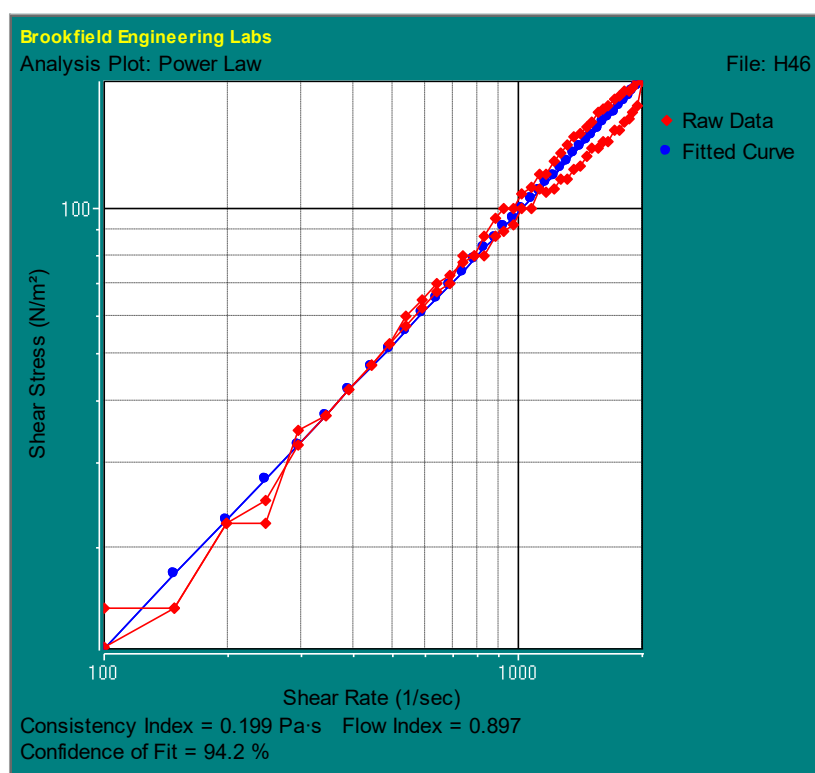


Figura 3.6 Regresia numerică a uleiului hidraulic H46 la temperatura de 20°C utilizând modelul legea puterii

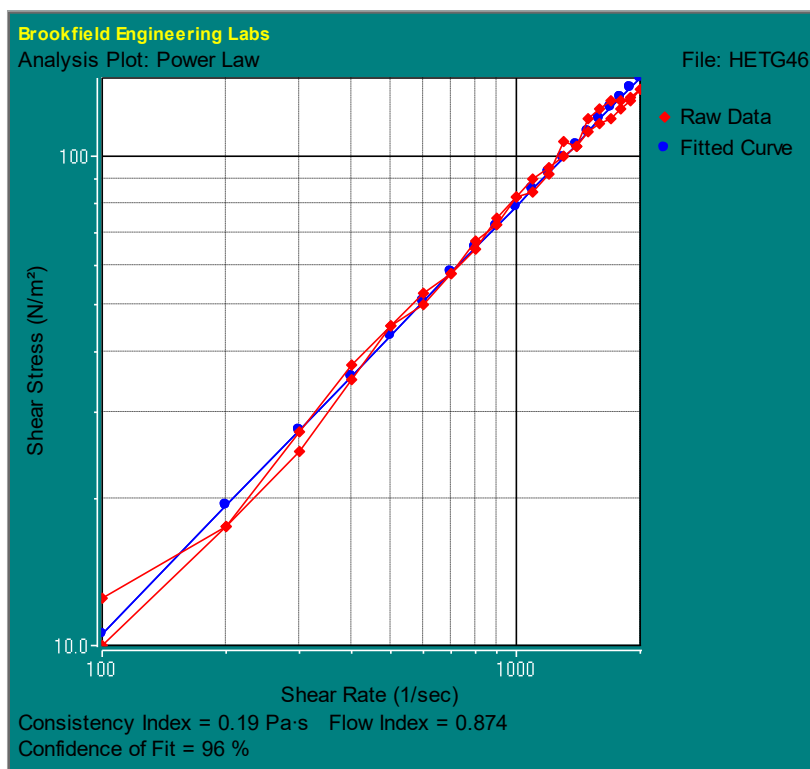


Figura 3.13 Regresia numerică a uleiului hidraulic biodegradabil HETG46 la temperatura de 20°C utilizând legea puterii

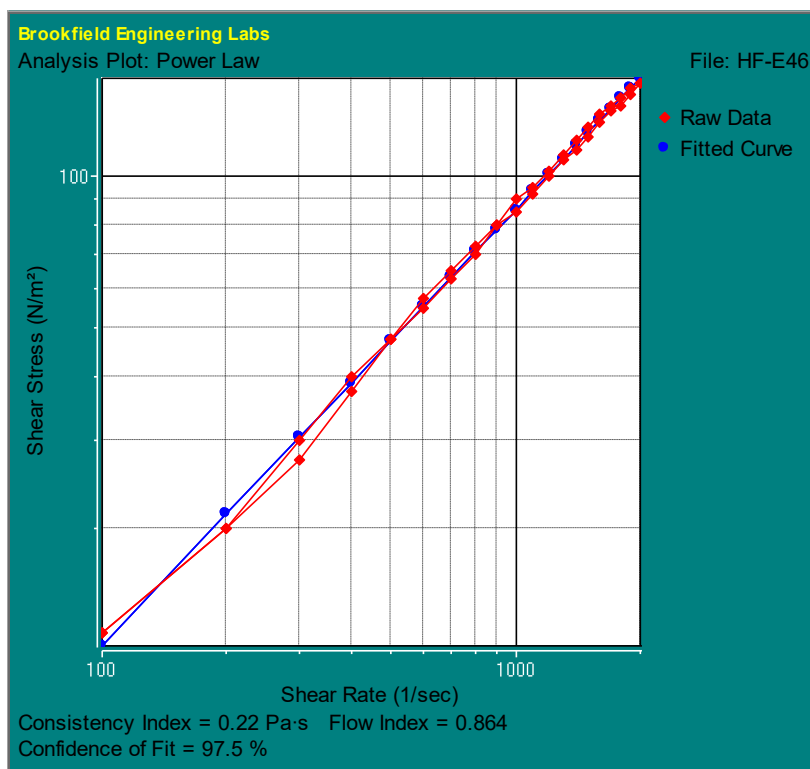


Figura 3.20 Regresia numerică a uleiului hidraulic HF-E46 la temperatura de 20°C utilizând legea puterii

În Tabel 3.3, Tabel 3.6, Tabel 3.9 sunt sintetizate rezultatele obținute în urma aplicării celor două modele reologice. Analizând rezultatele din tabele, se observă că modelul legea puterii prezintă un coeficient de corelație mai mic față de modelul newtonian putem spune că modelul care aproximează cel mai bine comportamentul reologic al acestor uleiuri este modelul newtonian.

Tabel 3.3 Parametri reologici ai uleiului hidraulic H46 la temperatura de 20°C

Tip ulei	Model reologic				
	Newtonian		Legea puterii		
	Viscozitate, [Pa·s]	Coeficient de corelație, [%]	Indice de consistență, [Pa·s ⁿ]	Indice de curgere	Coeficient de corelație, [%]
H46	0,0936	99,29	0,1991	0,8971	94,2

Tabel 3.6 Parametri reologici ai uleiului hidraulic HETG46 la temperatura de 20°C

Tip ulei	Model reologic				
	Newtonian		Legea puterii		
	Viscozitate, [Pa·s]	Coeficient de corelație, [%]	Indice de consistență, [Pa·s ⁿ]	Indice de curgere	Coeficient de corelație, [%]
HETG46	0,0752	99,49	0,19	0,874	96

Tabel 3.9 Parametri reologici ai uleiului hidraulic HF-E46 la temperatura de 20°C

Tip ulei	Model reologic				
	Newtonian		Legea puterii		
	Viscozitate, [Pa·s]	Coeficient de corelație, [%]	Indice de consistență, [Pa·s ⁿ]	Indice de curgere	Coeficient de corelație, [%]
HF-E46	0,0817	99,67	0,22	0,864	97,5

În Tabel 3.4, Tabel 3.7, Tabel 3.10 sunt prezentate rezultatele experimentale ale uleiurilor hidraulice, folosind modelul termic Reynolds. Analizând aceste rezultate, se observă că viscozitatea aparentă la temperatura de 50°C (η_{50°) scade odată cu creșterea gradientului de viteză, iar coeficientul de variație al viscozității cu temperatura (m) crește.

Tabel 3.4 Parametri caracteristici pentru variația viscozității în funcție de temperatură folosind modelul Reynolds pentru uleiul hidraulic H46

Parametri Gradient de viteză, s ⁻¹	H46		
	Viscozitatea la temperatura de 50°C, η_{50} [Pa · s]	Coeficientul de variație al viscozității cu temperatura, m [°C ⁻¹]	Coeficient de corelație, [%]
250	0,0300	0,039	96,71
500	0,0250	0,045	98,40
750	0,0266	0,048	99,51
1000	0,0200	0,057	99,89

Tabel Error! No text of specified style in document..1 Parametri caracteristici pentru variația viscozității în funcție de temperatură folosind modelul Reynolds pentru uleiul hidraulic HETG46

Parametri Gradient de viteză, s ⁻¹	HETG46		
	Viscozitatea la temperatura de 50°C, η_{50} [Pa · s]	Coeficientul de variație al viscozității cu temperatura, m [°C ⁻¹]	Coeficient de corelație, [%]
250	0,0300	0,031	96,62
500	0,0250	0,036	98,96
750	0,0199	0,042	99,52
1000	0,0150	0,058	99,36

Tabel Error! No text of specified style in document..2 Parametri caracteristici pentru variația viscozității în funcție de temperatură folosind modelul Reynolds pentru uleiul hidraulic HF-E46

Parametri Gradient de viteză, s ⁻¹	HF-E46		
	Viscozitatea la temperatura de 50°C, η_{50} [Pa · s]	Coeficientul de variație al viscozității cu temperatura, m [°C ⁻¹]	Coeficient de corelație, [%]
250	0,0300	0,035	98,18
500	0,0200	0,041	99,00
750	0,0166	0,050	99,89
1000	0,0175	0,052	99,84

Pe baza acestor determinări ale proprietăților reologice, s-a constatat faptul că:

- analizând rezultatele obținute pentru coeficienții de corelație, se observă faptul că, modelul newtonian aproximează cel mai bine comportamentul reologic celor trei uleiuri hidraulice, valorile coeficientului de corelație fiind mai mare de 95%. Acest rezultat indică faptul că uleiurile au un comportament newtonian.

→ din punct de vedere termic, prin intermediul relației Reynolds, s-a putut observa că variația viscozității cu temperatura aproximează foarte bine valorile experimentale, având coeficient de corelație mai mare de 96%.

Totodată, pe baza rezultatelor obținute, a fost realizată o comparație între uleiuri, unde s-a constatat faptul că:

- uleiurile biodegradabile HF-E46 și HETG46 prezintă o tixotropie foarte mică față de uleiul hidraulic H46 unde tixotropia acestuia este foarte bine pronunțată; motivul pentru care uleiurile biodegradabile au o tixotropie mai puțin pronunțată, față de uleiul mineral H46, este datorat modificărilor structurale dependente de timp, ale probei de ulei testate, cauzate de gradientul de viteză, ceea ce determină apariția buclei de histerezis de deformare [106].
- uleiul biodegradabil HF-E46 prezintă o viscozitate mai ridicată decât uleiul biodegradabil HETG46 și mai scăzută decât a uleiul hidraulic H46, unde panta acestuia este mai mare, ceea ce înseamnă că și viscozitatea este ridicată;
- pentru cele două uleiuri biodegradabile (HETG46 și HF-E46) nu sunt identificate diferențe semnificative în ceea ce privește variația viscozității cu temperatura.

În Capitolul 4 intitulat “ *Studiul reologic al uleiurilor hidraulici degradați termic*”, lubrifianții hidraulici au fost degradați termic apoi au fost determinați parametri reologici (viscozitate, indice de consistență, indice de curgere) utilizând aceleași modele reologice (Modelul legea puterii și Modelul newtonian).

În funcție de punctul de inflamabilitate al fiecărui ulei descris în fișa tehnică a acestora, au fost stabilite două, respectiv trei temperaturi la care uleiurile să fie degradate termic, și anume:

- pentru uleiul hidraulic mineral H46 au fost stabilite temperaturile de 130°C și 150°C;
- pentru uleiul hidraulice biodegradabile HETG46 și HF-E46 au fost stabilite temperaturile de 150°C, 200°C și 220°C.

Degradarea termică a presupus încălzirea și răcirea uleiurilor în mai multe cicluri, astfel: s-a folosit o cantitate de 200 ml de ulei, care a fost introdusă într-un echipament de încălzire cu transfer termic convectiv, cu scopul de a încălzi fluidul la temperatura stabilită,

timp de 15 minute, apoi răcit până când acesta a ajunge la temperatura de 22°C. Acest ciclu de încălzire-răcire a fost repetat de 8 ori.

În Tabel 4.1 sunt prezentate temperaturile medii ale uleiurilor pe durata întregului ciclu de degradare termică.

Tabel 4.1 Temperaturile medii corespunzătoare ciclului de degradare termică

Tip ulei Temperatura	130°C	150°C	200°C	220°C
H46	88°C	104°C	-	-
HETG46	-	101°C	131°C	162°C
HF-E46	-	94°C	142°C	164°C

Parametrii reologici ai uleiurilor degradate termic, au fost determinați utilizându-se metoda analizei de regresie, în ipoteza valabilității a două modele reologice, și anume, Modelul legea puterii și Modelul newtonian. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 4.2, Tabelul 4.4, Tabelul 4.6.

Tabel 4.2 Parametri reologici ai uleiului hidraulic mineral H46 la temperatura de 20°C

H46	Modele reologice				
	Newtonian		Legea puterii		
	Viscozitate, η [Pa · s]	Coefficient de corelație, [%]	Indice de consistență, m [Pa · s ⁿ]	Indice de curgere, n	Coefficient de corelație, [%]
130°C	0,0922	99,32	0,167	0,919	93,90
150°C	0,0927	99,34	0,165	0,922	94,00

Tabel 4.4 Parametri reologici ai uleiului hidraulic biodegradabil HETG46 la temperatura de 20°C

HETG46	Modele reologice				
	Newtonian		Legea puterii		
	Viscozitate, η [Pa · s]	Coefficient de corelație, [%]	Indice de consistență, m [Pa · s ⁿ]	Indice de curgere, n	Coefficient de corelație, [%]
150°C	0,0836	99,55	0,279	0,834	96,9
200°C	0,0882	99,59	0,229	0,869	97,6
220°C	0,0947	99,62	0,280	0,851	97,6

Tabel 4.6 Parametri reologici ai uleiului hidraulic biodegradabil HF-E46 la temperatura de 20°C

HF-E46	Modele reologice				
	Newtonian		Legea puterii		
	Viscozitate, η [Pa · s]	Coeficient de corelație, [%]	Indice de consistență, m [Pa · s ⁿ]	Indice de curgere, n	Coeficient de corelație, [%]
150°C	0,0835	99,64	0,229	0,861	98,1
200°C	0,0941	99,67	0,283	0,848	98,3
220°C	0,0998	99,79	0,195	0,908	98,3

Din punct de vedere reologic, datele au fost analizate în ipoteza valabilității a două modele reologice, și anume, modelul newtonian și modelul legea puterii. Utilizându-se metoda analizei de regresie, au fost determinați parametri reologici ai uleiurilor, fiind observat faptul că modelul reologic care aproximează cel mai bine comportamentul celor trei uleiuri, atât proaspete cât și degradate termic, este modelul newtonian, deoarece prezintă coeficient de corelație de peste 99%, față de modelul legea puterii, unde coeficientul de corelație este în medie de 96%.

Din rezultatele obținute, prin aplicarea modelului legea puterii s-a observat faptul că indicele de curgere este mai mic decât 1, ceea ce înseamnă că uleiurile au un comportament pseudoplastic, adică acestea încep să curgă indiferent de forța care se aplică asupra lor. Acest comportament pseudoplastic este important în aplicațiile industriale unde o scădere a viscozității poate reduce eficiența fluidului în sistemele hidraulice.

Uleiurile studiate fac parte din categoria fluidelor nenewtoniene dependente de timp, care odată supuse la forfecare, în structura acestora apar modificări în timp, atât a tensiunii de forfecare cât și a viscozității. În această categorie de fluide nenewtoniene dependente de timp fac parte și fluidele tixotropice.

În Capitolul 5 intitulat “*Analiza prin spectroscopie în infraroșu cu transformare Fourier ale uleiurilor hidraulice*”, a fost realizată o analiză prin spectroscopie a uleiurilor hidraulice aflate atât în stare proaspătă cât și degradate termic, ulterior realizându-se comparația între acestea.

Analiza FTIR a uleiurilor hidraulice, s-a realizat prin intermediul spectrometrului Nicolet iS50R (Figura 5.1), dotat cu un accesoriu de reflexie totală atenuată (ATR) prevăzut cu o celulă cu cristal de diamant, complet reflectorizant și un detector de sulfat de trigliceridă deuterat (DTGS).



Figura 5.1 Spectrometrul Thermo Nicolet iS50 FTIR [120]

Probele de ulei au fost măsurate la temperatura camerei, unde s-a efectuat pentru fiecare probă 32 de scanări între 400 și 4000 cm^{-1} , cu o rezoluție de 4 cm^{-1} . Înregistrarea spectrelor a fost realizată prin conectarea unui calculator la spectrometru, iar prelucrarea rezultatelor a fost posibilă datorită programului OMNIC 32.

În Figura 5.5, Figura 5.11, Figura 5.17 este prezentat spectrul FTIR comparativ între uleiul hidraulic proaspăt și cel degradat termic.

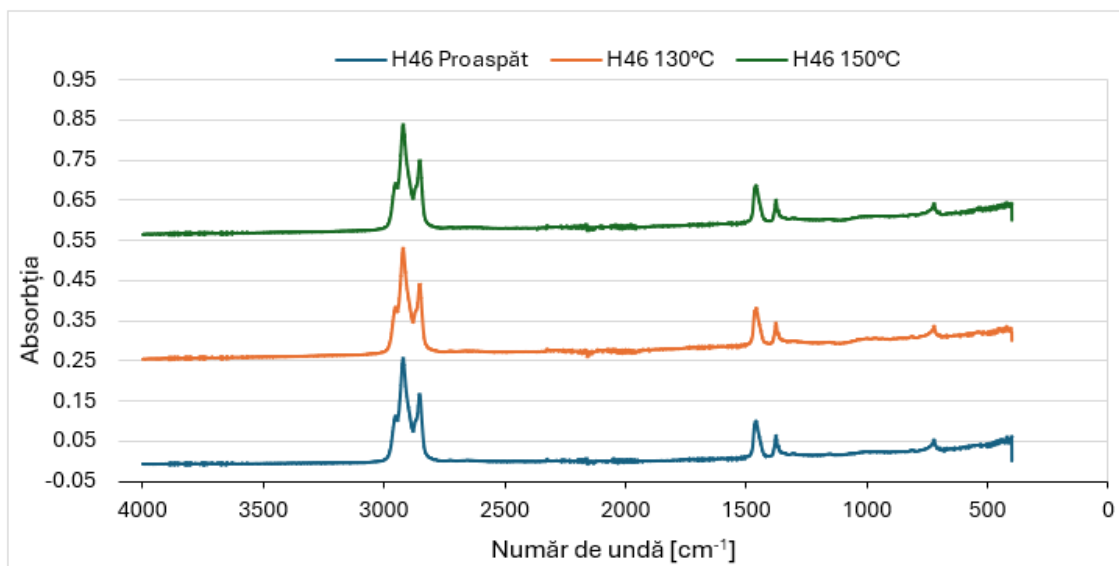


Figura 5.5 Spectru FTIR comparativ al uleiului hidraulic mineral H46

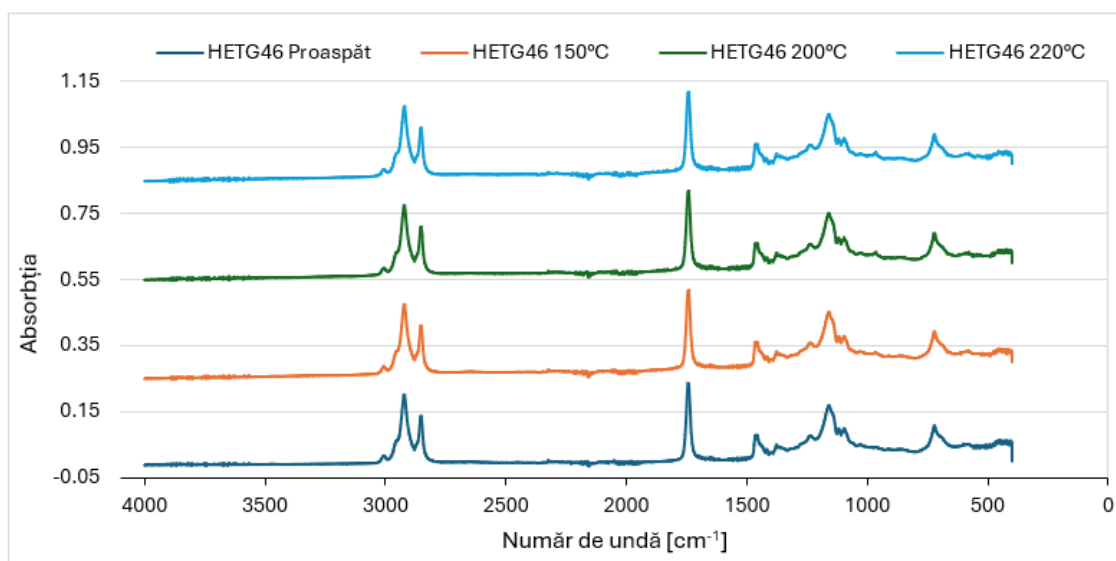


Figura 5.11 Spectru FTIR comparativ al uleiului hidraulic biodegradabil HETG46

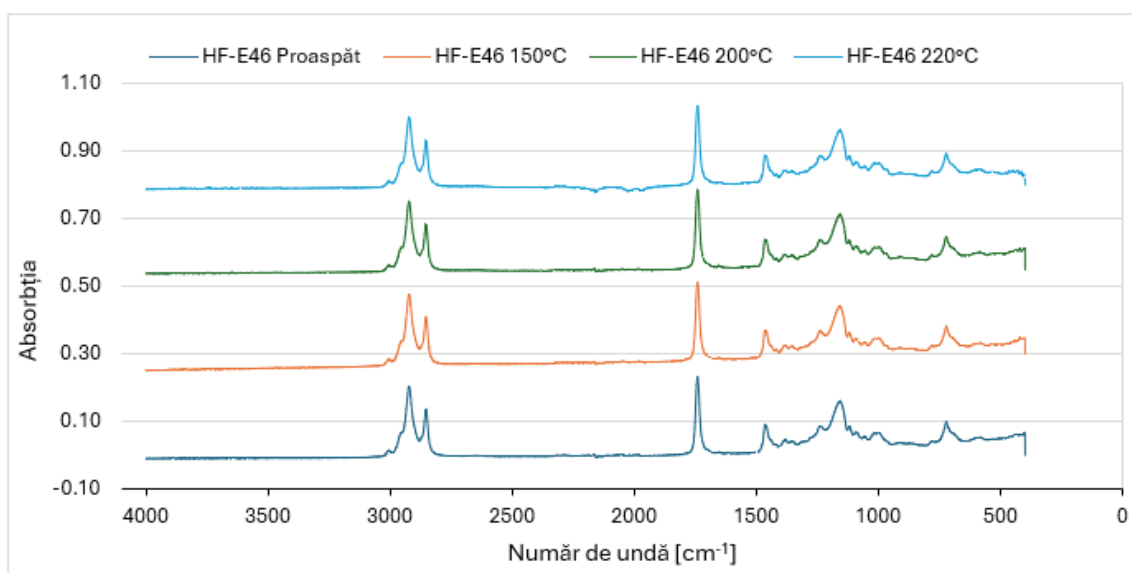


Figura 5.17 Spectru FTIR comparativ al uleiului hidraulic biodegradabil HF-E46

Scop principal al acestei analize a fost de a identifica modificările structurale ale uleiurilor hidraulice aflate în stare proaspătă și totodată degradate termic.

Întrucât spectrele analizei FTIR ale uleiurilor hidraulice minerale și ale celor biodegradabile (proaspete și degradate termic), sunt în esență aceleași, putem concluziona că nu apare un nou tip de legătură.

Acest lucru se realizează următorilor factori:

- probele testate sunt concepute a fi rezistente la temperaturi ridicate;

- perioada de timp în care s-a realizat degradare termică nu a fost suficient de lungă, astfel încât să apară modificări structurale;
- stabilitatea chimică a uleiului hidraulic la temperatură este asigurată de prezența aditivilor (antioxidanți, agenți anticorozivi, antispumanți etc.), care reduc viteza reacțiilor de degradare chimică. La temperaturi foarte ridicate (în timpul testului, până la 200–220°C), uleiurile biodegradabile prezintă o creștere a viscozității, fenomen atribuit formării compușilor identificați prin benzile de absorbție (vârfurile) evidențiate în spectrele FTIR ale uleiurilor testate la diferite temperaturi. Pentru a fi siguri de acest lucru, ar trebui efectuate investigații suplimentare, deoarece analiza FTIR va identifica tipurile de legături și nu compușii din ulei, iar acest lucru nu poate fi folosit ca dovadă că un compus sau un amestec nu a suferit nicio transformare, ci doar că nu au apărut noi tipuri de legături.

În Capitolul 6 intitulat “*Studiul funcționării standului acționat hidraulic prin testare experimentală*”, a fost realizat standul experimental acționat hidraulic, prin colaborare cu Institutul de Cercetări pentru Hidraulică și Pneumatică (INOE 2000-IHP).

Scopul sistemului acționat hidraulic constă în determinarea caracteristicilor funcționale, respectiv a variației parametrilor hidraulici în funcție de timp.

Parametrii hidraulici fundamentali care caracterizează modul de funcționare ale unui sistem hidraulic sunt momentul, turația, debitul și diferența de presiune între racordurile de intrare și ieșire, aceștia influențând direct eficiența și performanțele sistemului hidraulic [124].

Standul experimental este alcătuit din două sisteme de acționare hidraulice identice, conectate printr-un element de legătură: un sistem funcționează cu uleiul hidraulic mineral, iar celălalt cu un ulei hidraulic biodegradabil. Totodată, datorită construcției, este eliminată posibilitatea de contaminare cu un alt tip de ulei, în momentul în care instalația nu este curățată corespunzător.

Inovația standului constă în faptul că cele două sisteme lucrează în interdependență, astfel: cilindrul din partea stângă funcționează alternativ ca motor și ca sarcină, iar cilindrul din partea dreaptă devenind sarcină și apoi motor, această alternanță fiind posibilă datorită distribuitorului 4/3 al fiecărui sistem.

În Figura 6.1 este prezentată schema de funcționare a instalației hidraulice, iar în Figura 6.2 și Figura 6.3 sistemul hidraulic din cadrul laboratorului împreună cu panoul electric, Figura 6.5. Uleiurile propuse pentru punerea în funcțiune a standului, a fost uleiul hidraulic mineral H46 și uleiul hidraulic biodegradabil HETG46.

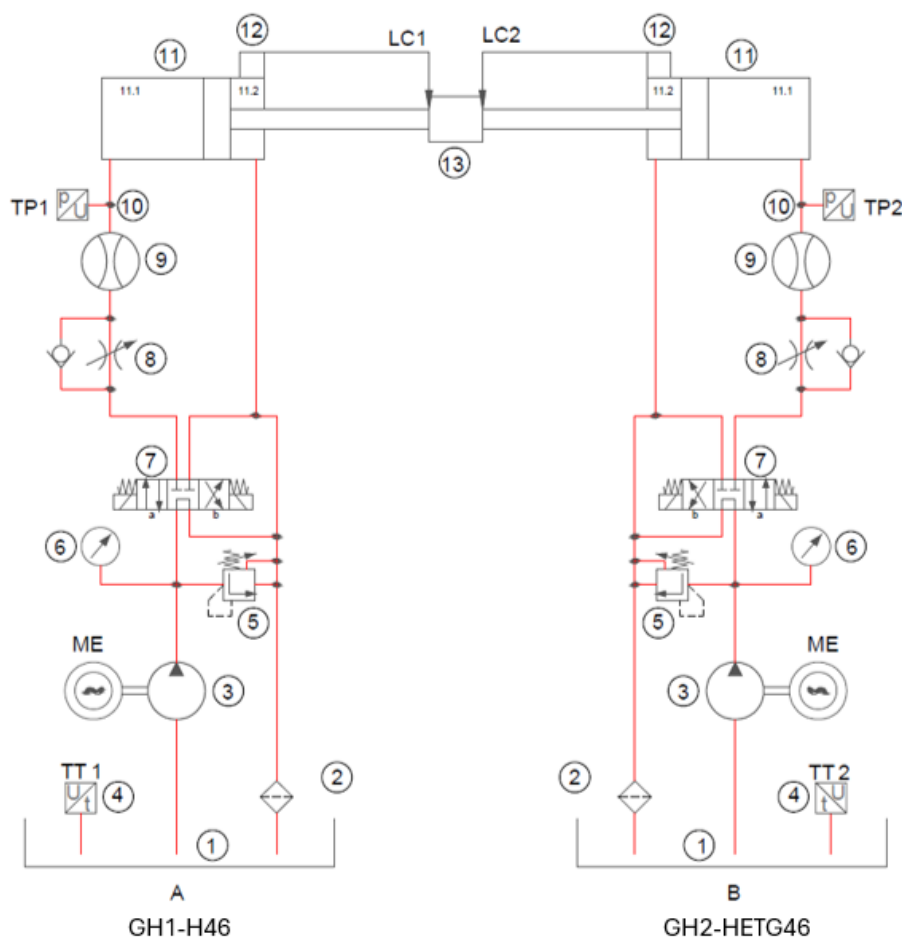


Figura 6.1 Schema de funcționare a instalației hidraulice

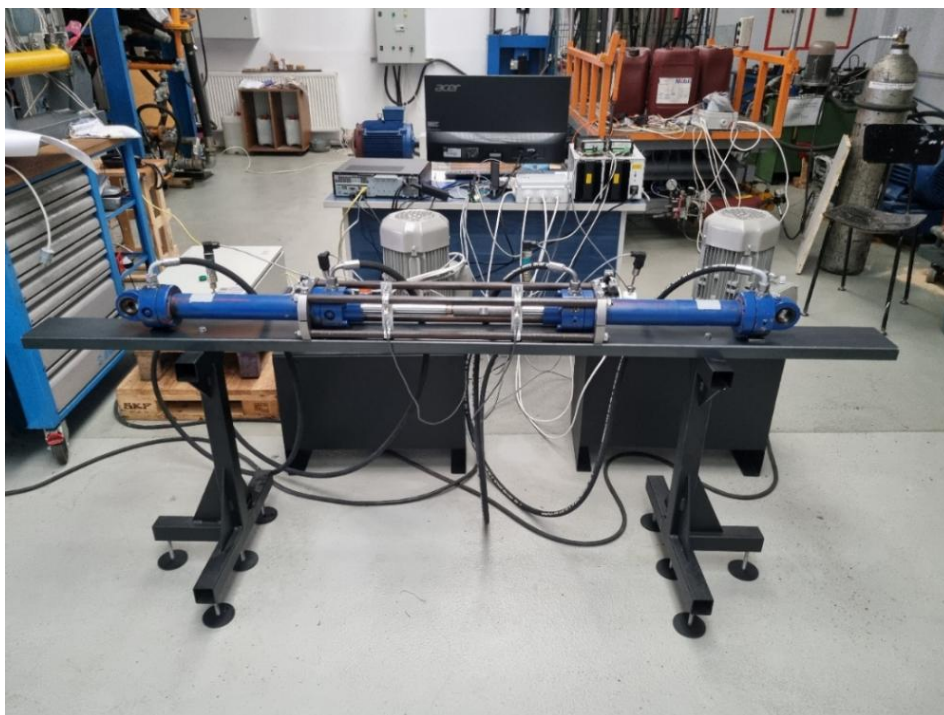


Figura Error! No text of specified style in document..5 Prototip stand-vedere 1



Figura Error! No text of specified style in document..6 Prototip stand experimental-vedere 2



Figura Error! No text of specified style in document..7 **Panoul electric cu contoarele de energie**

În Figura 6.6 este prezentată schema sistemului de achiziție a datelor.

Pentru înregistrarea datelor experimentale se utilizează o placă de achiziție a datelor. Traductoarele pentru parametrii de interes (presiuni, debite, temperaturi, putere, număr de cicluri), plasate în instalație, sunt conectate la placa de achiziție a datelor care este conectată la un calculator prin port USB. Numărul de cicluri al cilindrilor hidraulici este numărat de aplicația LabView printr-o intrare digitală a plăcii de achiziție a datelor, care primește semnal prin intermediul unui contact (NC1) al releului din modulul controlerului.

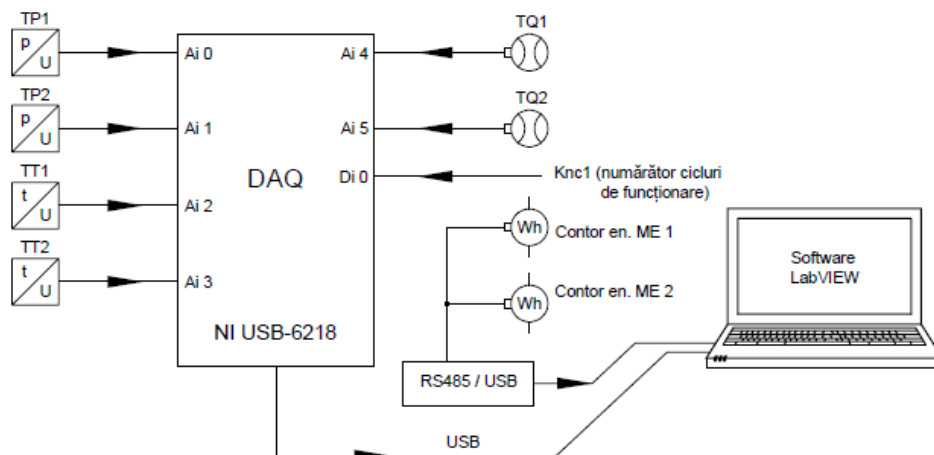


Figura 6.6 Schema sistemului de achiziție a datelor

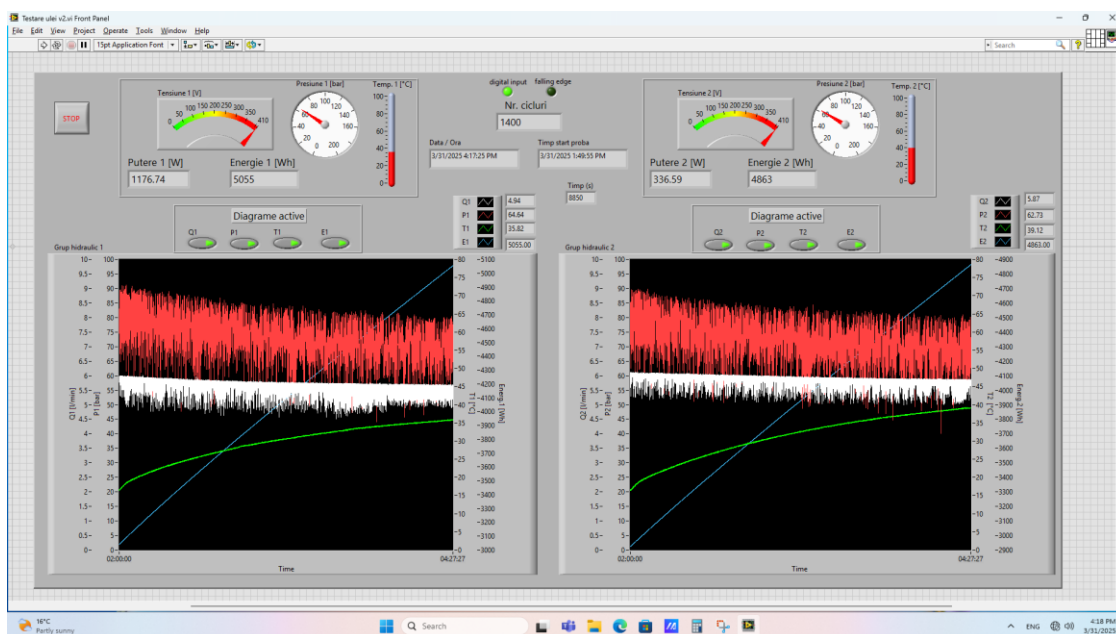


Figura Error! No text of specified style in document..8 Rezultatele parametrilor de interes (presiune, temperatură, debit, și energie electrică) înregistrați în aplicația LabVIEW

În Tabel 6.2 sunt prezentați parametrii hidraulici rezultați în urma unui ciclu de funcționare al cilindrilor hidraulici pe standul experimental. Valorile afișate reprezintă mediile obținute pe durata întregului ciclu de funcționare.

Tabel 6.2 Parametrii hidraulici obținuți pe standul experimental

Parametri hidraulici	Unitate măsură	Stand experimental	
		H46	HETG46
Presiune	[bar]	74,25	72,89
Debit	[l/min]	5,60	5,82
Puterea consumată	[W]	819,05	789,17
Energie electrică	[Wh]	4080	3917
Temperatura	[°C]	29,46	31,25

În Capitolul 7 intitulat “*Simularea standului experimental în programul Simcenter Amesim*”, a fost prezentat programul Simcenter Amesim utilizat pentru simularea standului experimental, cu scopul obținerii acelorași parametri hidraulici obținuți pe standul experimental din laborator (presiune și debit).

În Tabel 7.2 sunt sumarizate rezultatele parametrilor hidraulici obținuți din programul de simulare Simcenter Amesim. Prin intermediul acestor rezultate au fost determinate randamentul volumic la pompă și randamentul total al sistemelor hidraulice.

Tabel 7.2 Parametrii hidraulici obținuți în simulare

Parametri hidraulici	Unitate măsură	Simulare Amesim	
		H46	HET46
Presiune	[bar]	79,49	79,52
Debit	[l/min]	6,45	6,45
Moment de torsiune	[Nm]	5,47	5,47
Randament hidro-mecanic (0,9 ÷ 0,95)	-	0,92	

Rezultatele obținute pe standul experimental (subcapitol 6.4), unde au fost studiate parametri hidraulici (presiune, debit, temperaturi, putere utilă, putere consumată, randamentul fiecărui grup de pompare), urmează a fi comparate cu rezultatele obținute din simularea numerică (subcapitol 7.2).

Pornind de la parametri hidraulici evidențiați în **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.**, au fost realizate grafice comparative în care sunt puse în evidență diferența între rezultatele obținute pe standul experimental și cele din simulare.

În **Error! Reference source not found.** este pusă în evidență diferența între presiunile obținute pe standul experimental din cadrul laboratorului și cele rezultate din simulare.

Se observă faptul că presiunea obținută în urma simulării standului experimental este mai mare față de cea rezultată de pe standul experimental atât pentru uleiul hidraulic mineral, cât și pentru cel biodegradabil, deoarece în simulare căderile de presiuni sunt neglijate, componentele din instalație au un comportament ideal, conductele care fac legătura cu elementele componente nu prezintă imperfecțiuni. Pe standul experimental, acești factori sunt prezenți, care au condus mai departe la pierderile de presiune.

Totodată, în simulare, temperatura uleiurilor este constantă, față de standul experimental, unde aceasta crește, conform **Error! Reference source not found.**, și are care rezultate scăderea viscozității care influențează comportamentul fluidului.

De asemenea, diferența între presiunile celor două uleiuri hidraulice obținute pe standul experimental este dată de proprietățile uleiurilor prezentate în Tabel 3.1, mai exact de viscozitatea cinematică. Cu cât aceasta este mai mică, pierderi hidraulice încep să apară, ceea ce duce la scăderea presiunii. Această observație este valabilă și în cazul simulării.

Concluzii finale

Studiul elaborat în cadrul prezentei teze de doctorat, având ca subiect principal „*Contribuții privind analiza fluidelor hidraulice minerale și biodegradabile pentru sisteme industriale*” a avut ca rezultat următoarele aspecte:

→ *Stadiul actual al cercetărilor experimentale privind lubrifiantii hidraulici minerali și biodegradabili* prezintă progrese importante în ceea ce privește evaluarea performanțelor acestora. Rezultatele obținute în urma cercetărilor evidențiază posibilitatea în anumite situații de înlocuire a uleiurilor hidraulice minerale cu cele biodegradabile. Uleiurile biodegradabile prezintă interes pentru aplicațiile din industria hidraulică datorită proprietăților fizico-chimice bune și menținerii eficienței energetice comparativ cu sistemele hidraulice clasice. Uleiurile vegetale sunt considerate resurse regenerabile și se caracterizează printr-o rată accelerată de biodegradare în mediul natural.

- *Comportamentul reologic al celor trei tipuri de uleiuri hidraulice (H46, HETG46, HF-E46) aflate în stare proaspătă și degradate termic.* În ceea ce privește studiul reologic, au fost propuse două modele reologice (modelul newtonian și legea puterii) prin intermediul cărora au fost determinați parametrii reologici, și anume: indice de consistență, viscozitate și indice de curgere. Prin intermediul acestor parametri s-a constatat faptul că modelul newtonian aproximează cel mai bine datele experimentale. De asemenea, s-a determinat influența temperaturii asupra viscozității prin utilizarea modelului Reynolds, care este un model de tip exponențial și prin care, ca urmare a aplicării acestuia, a rezultat scăderea viscozității odată cu gradientului de viteză.
- *Analiza prin spectroscopie în infraroșu cu transformare Fourier a uleiurilor hidraulice proaspete și degradate termic* a evidențiat faptul că între cele două variante studiate nu există diferențe semnificative în ceea ce privește rezultatele obținute. Scopul acestei analize a fost acela de a observa dacă în urma degradării termice, au fost create noi legături chimice. Aceste rezultate au fost datorate stabilității chimice, asigurată de prezența aditivilor din ulei.
- *Realizarea standului experimental* care a avut ca scop principal determinarea caracteristicilor funcționale pentru fiecare sistem hidraulic de acționare, în funcție de tipul de ulei pe care îl utilizează. Rezultatele obținute după 1400 cicluri (curse) de funcționare a cilindrilor hidraulici, confirmă că uleiurile hidraulice biodegradabile pot reprezenta un înlocuitor al uleiurilor hidraulice minerale, datorate performanțelor obținute. Astfel, utilizarea uleiului biodegradabil HETG46 a condus la creșterea randamentului întregului grup de pompare cu 5,9%, la majorarea puterii utile cu 2% și la reducerea consumului de energie electrică cu 4%. Rezultatele arată eficiența energetică bună a uleiului hidraulic biodegradabil, fapt pentru care acesta poate înlocui în mod adecvat uleiul clasic mineral în sistemele hidraulice de acționare. Performanțele uleiului biodegradabil HETG46 au fost confirmate, de asemenea, prin intermediul simulării numerice realizate în programul Simcenter Amesim.

Contribuții personale

Întrucât scopul acestei cercetări a fost de a evalua compatibilitatea și eficiența utilizării unui ulei biodegradabil ca alternativă la uleiul mineral, au fost aduse următoarele contribuții personale:

- Parcurgerea unor studii din literatura de specialitate cu privire la uleiurile hidraulice minerale și biodegradabile (uleiuri vegetale);
- Studiul performanțelor uleiurilor hidraulice minerale și biodegradabile în aplicațiile industriale, în concordanță cu impactul acestora asupra componentelor și al mediului;
- Realizarea unei metodologii de lucru etapizată pentru evaluarea comportamentului reologic al celor trei tipuri de uleiuri hidraulice (H46, HETG46, HF-E46) aflate în stare proaspătă și degradate termic;
- Elaborarea programului de testare necesar operării echipamentului de testare Brookfield CAP2000+;
- Realizarea măsurărilor, prelucrarea, reprezentarea și interpretarea grafică a rezultatelor necesare studiului reologic în cadrul departamentului de Organe de Mașini și Tribologie din cadrul POLITEHNICA București;
- Stabilirea regimurilor de temperatură pentru degradarea termică a uleiurilor în funcție de punctul de inflamabilitate și efectuarea procedurii de degradare;
- Realizarea, prelucrarea, reprezentarea și interpretarea grafică a rezultatelor analizei FTIR prin colaborare cu Centrul de Cercetare Avansată pentru Materiale, Produse și Procese Inovatoare, POLITEHNICA București;
- Realizarea unui stand experimental, format din două grupuri de pompare, prin colaborare cu Institutul de Cercetări pentru Hidraulică și Pneumatică (INOE 2000-IHP) pentru testarea a două uleiuri hidraulice (H46 și HETG46);
- Efectuarea testărilor experimentale, prelucrarea, reprezentarea și interpretarea grafică a rezultatelor necesare pentru determinarea randamentului volumic al pompei și al întregului grup hidraulic;
- Efectuarea unei simulări prin intermediul programului Simcenter Amesim, pentru validarea rezultatelor obținute pe standul experimental;
- Diseminarea rezultatelor obținute în cadrul cercetării prin publicarea și prezentarea rezultatelor în articole științifice în reviste de specialitate și la conferințe internaționale, lista acestora fiind prezentă la finalul acestei lucrări.

Perspectivile lucrării

Pe baza rezultatelor obținute, autoarea își propune continuarea cercetărilor asupra acestor uleiuri în următoarele direcții:

- Studiul influenței uleiurilor biodegradabile asupra echipamentelor hidraulice;
- Evaluarea comportamentului tribologic prin măsurarea și analiza unor parametri precum coeficientului de frecare, diametrul urmei de uzură, rata de uzură a acestora și parametrii de rugozitate;
- Studiul reologic al altor uleiuri hidraulice biodegradabile și compararea acestora cu cele studiate în prezenta teză.

Bibliografie

- [8] *Bart J. C. J., Gucciardi E., and Cavallaro S.*, “Lubricants: properties and characteristics,” in *Biolubricants*, Elsevier, 2013, pp. 24–73.
- [21] *Bart J. C. J., Gucciardi E., and Cavallaro S.*Eds., *Biolubricants: science and technology*. Cambridge, UK ; Philadelphia, PA: Woodhead Publishing, 2013.
- [26] *Cecilia J. A., Ballesteros Plata D., Alves Saboya R. M., Tavares De Luna F. M., Cavalcante C. L., and Rodríguez-Castellón E.*, “An Overview of the Biolubricant Production Process: Challenges and Future Perspectives,” *Processes*, **vol. 8**, no. 3, p. 257, Feb. 2020.
- [27] *Berman D.*, “Plant-Based Oils for Sustainable Lubrication Solutions—Review,” *Lubricants*, **vol. 12**, no. 9, p. 300, Aug. 2024.
- [31] *Majdan R., Tkáč Z., Abrahám R., Stančík B., Kureková M., and Paulenka R.*, “Effect of Ecological Oils on the Quality of Materials of Hydraulic Pump Components,” *AMR*, **vol. 801**, pp. 1–6, Sept. 2013.
- [35] *Deuster S. and Schmitz K.*, “Bio-Based Hydraulic Fluids and the Influence of Hydraulic Oil Viscosity on the Efficiency of Mobile Machinery,” *Sustainability*, **vol. 13**, no. 14, p. 7570, July 2021
- [74] *Muscă I.*, *Comportarea uleiurilor lubrifiante sub presiune*. Bucuresti: Editura Didactica si Pedagogica, 2004.
- [78] *Tudose R. Z., Volintiru T., and Lungu M.*, *Reologia compușilor macromoleculari*. Editura Tehnică., 1982.
- [90] *Bhattad A.*, “Review on viscosity measurement: devices, methods and models,” *J Therm Anal Calorim*, **vol. 148**, no. 14, pp. 6527–6543, July 2023.
- [91] *Brookfield Engineering Laboratories, Inc.*, “BROOKFIELD CAP 2000+, Viscometer Operating Instructions.”
- [92] *Wan Nik W. B., Zulkifli F., Lam S. S., Rahman M. M., Yusof A. A., and Rahman M. M.*, “Experimental Studies on the Rheological and Hydraulic Performance of Palm Based Hydraulic Fluid,” *Jurnal Teknologi*, **vol. 66**, no. 3, Feb. 2014
- [95] *Mobil Industrial*, “Fișa tehnică a uleiului hidraulic H46,” Technical Data Sheet.
- [96] *Kajo Lubricants*, “Fișa tehnică a uleiului hidraulic HETG46,” Technical Data Sheet.
- [97] *Shell*, “Fișa tehnică a uleiului hidraulic HF-E46,” Technical Data Sheet.

- [103] *Olszak A., Osowski K., Musiałek I., Rogoś E., Kęsy A., and Kęsy Z.*, “Application of Plant Oils as Ecologically Friendly Hydraulic Fluids,” *Applied Sciences*, **vol. 10**, no. 24, p. 9086, Dec. 2020.
- [104] *Petlyuk A. M. and Adams R. J.*, “Oxidation Stability and Tribological Behavior of Vegetable Oil Hydraulic Fluids,” *Tribology Transactions*, **vol. 47**, no. 2, pp. 182–187, Apr. 2004.
- [105] *Uppar R., Dinesha P., and Kumar S.*, “A critical review on vegetable oil-based bio-lubricants: preparation, characterization, and challenges,” *Environ Dev Sustain*, **vol. 25**, no. 9, pp. 9011–9046, Sept. 2023
- [106] *Malkin A. Ya. and Khadzhiev S. N.*, “On the rheology of oil (Review),” *Pet. Chem.*, **vol. 56**, no. 7, pp. 541–551, July 2016.
- [120] *Thermo Scientific*, “Broșură Nicolet iS50 FT-IR Spectrometer.” Thermo Fisher Scientific.
- [124] *Vasiliu N. and Vasiliu D.*, *Acționări hidraulice și pneumatice*, **vol. 1**. București, România: Editura Tehnică, 2005.