



Domeniul Inginerie Civilă și Instalații

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Beton ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin

...

...

Student-doctorand:

Ing. Brăduț Alexandru

IONESCU.....

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Călin Grigore Radu

MIRCEA

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Daniela Lucia MANEA** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Călin Grigore Radu MIRCEA**

- Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

- Prof. Dr. Ing. **Sorin Ioan DAN** - Universitatea „Politehnica” din Timișoara;

- Conf. Dr. Ing. **Maria GOREA** - Universitatea Babeș-Bolyai din Cluj-Napoca;

- Conf. Dr. Ing. **Attila PUSKÁS** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

- Cluj-Napoca -
2022

CUPRINS

ABREVIERI.....	11
INTRODUCERE.....	13
1.1. Justificarea abordării temei.....	13
1.2. Încadrarea temei în preocupările internaționale și naționale.....	13
1.3. Titlul tezei, premisele și obiectivele cercetării.....	14
1.4. Conținutul tezei de doctorat.....	15
STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII.....	17
2. Stadiul actual al cercetărilor materialelor geopolimere.....	17
2.1. Istoricul materialelor geopolimere.....	17
2.2. Perspective globale în contextul implementării conceptu-lui de "economie circu-lară".....	19
2.3. Aspecte structurale, compoziționale și chimice.....	20
2.3.1. Structura materialelor geopolimere.....	20
2.3.2. Tipurile și mecanismele reacțiilor de geopolimerizare.....	21
2.3.3. Materii prime. Tipuri de activatori alcalini. Influența ma-teriei prime asupra re-acției de geopolimerizare.....	26
2.3.3.1. Cenușa zburătoare (Fly ash F.A.).....	28
2.3.3.2. Zgura de furnal (Blast furnace slag B.F.S.).....	43
2.3.3.3. Praf de marmură (Marble dust M.D.).....	43
2.3.4. Tratamente termice. Influența tratamentului termic asupra reacției de geopoli-merizare.....	51
2.3.5. Analiză în infraroșu cu transformată Fourier (FTIR)	53
2.4. Proprietățile materialelor geopolimere activate alcalin.....	56
2.4.1. Factorii care influențează proprietățile materialelor geopolimere activate alcalin.....	56
2.4.1.1. Raportul siliciu-alumină (Si/Al) al materiilor prime.....	56
2.4.1.2. Concentrația soluției de NaOH și a raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	57
2.4.2. Influența materiei prime și a tratamentului termic asupra proprietăților fizico-mecanice.....	62
2.4.2.1. Efectele tratamentului termic asupra proprietăților geopolimerului.....	62
2.4.2.2. Rezistențe la compresiune ale geopolimerilor realizați cu tratament termic.....	65
2.4.2.3. Rezistențe la compresiune ale geopolimerilor realizați fără tratament termic.....	68
2.4.3. Influența materiei prime și tratamentului termic asupra durabilității.....	69
2.5. Aplicații ale materialelor geopolimere activate alcalin.....	71
CONTRIBUȚIE PERSONALĂ.....	73
3. Ipoteze de lucru.....	73
4. Metodologia generală.....	73
5. Liant ecologic mineral activat alcalin (pastă geopolimeră)	74
5.1. Introducere.....	74
5.2. Obiective.....	75
5.3. Materiale și metode.....	76
5.3.1. Cercetări preliminare privind producerea liantului ecologic activat alcalin.....	76
5.3.1.1. Caracteristicile materiilor prime utilizate.....	76

5.3.1.2. Stabilirea substituienților cenușii zburătoare și a adaosurilor.....	79
5.3.1.3. Stabilirea activatorilor alcalini și a molarității soluției de NaOH.....	81
5.3.1.4. Stabilirea raportului dintre $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	81
5.3.1.5. Stabilirea modului de realizare a lianților ecologici cu / fără tratament termic. Temperatura și durata tratamentului termic.....	82
5.3.1.6. Stabilirea încercărilor și vârstele de testare.....	82
5.3.2. Proiectarea și realizarea lianților ecologici activați alcalin cu diferite substituții și adaosuri.....	82
5.3.3. Încercări efectuate pe pastele ecologice activate alcalin.....	84
5.3.3.1. Determinarea densității aparente.....	84
5.3.3.2. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere.....	86
5.3.3.3. Determinarea rezistenței la compresiune.....	88
5.3.3.4. Determinarea absorbției totale și a porozității deschise.....	89
5.3.3.5. Spectroscopie cu IR cu transformată Fourier (FTIR).....	90
5.3.3.6. Analiza microscopică.....	91
5.4. Rezultate.....	92
5.5. Discuții.....	96
5.5.1. Determinarea densității aparente.....	96
5.5.1.1. Liant ecologic pe bază de cenușă zburătoare.....	97
5.5.1.2. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură.....	98
5.5.1.3. Liant ecologic realizat substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu zgură de furnal.....	103
5.5.1.4. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare cu perlit și praf de marmură.....	105
5.5.1.5. Liant ecologic realizat cu diferite adaosuri și procente la cenușa zburătoare.....	107
5.5.2. Rezistența la întindere prin încovoiere.....	119
5.5.2.1. Liant ecologic pe bază de cenușă zburătoare.....	119
5.5.2.2. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură.....	120
5.5.2.3. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu zgură de furnal.....	125
5.5.2.4. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare cu perlit și praf de marmură.....	127
5.5.2.5. Liant ecologic realizat cu diferite adaosuri și procente la cenușa zburătoare.....	128
5.5.3. Rezistența la compresiune.....	134
5.5.3.1. Liant ecologic realizat pe bază de cenușă zburătoare.....	134
5.5.3.2. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură.....	135
5.5.3.3. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu zgură de furnal.....	140
5.5.3.4. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare cu perlit și praf de marmură.....	143
5.5.3.5. Liant ecologic realizat cu diferite adaosuri și procente la cenușa zburătoare.....	144
5.5.4. Determinarea porozității deschise și a absorbției toatale de apă.....	150
5.5.5. Spectroscopie cu IR cu transformată Fourier (FTIR)	154

5.5.6. Analiza microscopică a pastelor geopolimere cu substituție a cenușii zburătoare realizate cu/fără tratament termic.....	157
5.5.7. Influența raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ asupra rezistențelor mecanice a lianților ecologici pe bază de cenușă zburătoare, cu molarități diferite ale soluției de NaOH	159
5.5.8. Influența raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ asupra rezistențelor la compresiune și încovoiere a probelor realizate cu substituție de praf de marmură (10%, 25% și 50%) în comparație cu probele martor.....	161
5.5.9. Influența tratamentului termic asupra proprietăților mecanice ale liantului ecologic activat alcalin cu substituție de praf de marmură.....	164
5.5.10. Influența substituției cenușii zburătoare cu zgură de aluminiu.....	166
5.6. Concluzii.....	170
6. Beton ecologic bază de lianți minerali activați alcalin.....	178
6.1. Introducere.....	178
6.2. Obiective.....	178
6.3. Materiale și metode.....	179
6.4. Rezultate.....	181
6.4.1. Determinarea densității aparente.....	181
6.4.2. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere.....	183
6.4.2.1. Compozițiile M2, M3 și M4 (70°C, 24h)	183
6.4.2.2. Compozițiile M5, M6 și M7 (23°C)	184
6.4.3. Determinarea rezistenței la compresiune.....	186
6.4.3.1. Compozițiile M2, M3 și M4 (70°C, 24h).....	186
6.4.3.2. Compozițiile M5, M6 și M7 (23°C)	187
6.4.4. Determinarea absorbției de apă.....	188
6.4.5. Evaluare microscopică.....	190
6.4.6. Evaluarea compozițională prin metoda difracției cu raze X (XRD)	191
6.4.6.1. Caracterizarea materiilor prime prin metoda difracției cu raze X (XRD)	192
6.4.6.2. Caracterizarea betonului ecologic prin metoda difracției cu raze X (70°C, 24h)	194
6.4.6.3. Caracterizarea betonului ecologic prin metoda difracției cu raze X (23°C)	196
6.5. Concluzii.....	200
7. Concluzii finale.....	202
7.1. Concluzii generale.....	202
7.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei.....	207
REFERINȚE.....	209
LISTA FIGURILOR.....	233
LISTA TABELELOR.....	241
ANEXE.....	247
PUBLICAȚII.....	249

INTRODUCERE

1.1. Justificarea abordării temei

Una dintre problemele actuale ale omenirii o constituie încălzirea globală, cauzată de acumularea în atmosferă a gazelor cu efect de seră. Poluarea aerului reprezintă procesul de modificare a caracteristicilor naturale ale atmosferei, ca urmare a acțiunilor unor agenți de natură chimică, fizică sau biologică, cu efect nociv asupra mediului. Principalii poluanți atmosferici sunt: dioxidul de carbon (CO_2), monoxidul de carbon (CO), dioxidul de sulf (SO_2), dioxidul de azot (NO_2), pulberile în suspensie (PM), compușii organici volatili (COV), benzenul și metalele grele. Dioxidul de carbon (CO_2) este un gaz cu efect de seră, care este emis prin arderea combustibililor fosili. Sursele majore de producere a CO_2 sunt reprezentate de producția de energie termo-electrică, industria prelucrătoare și industria metalurgică.

În consecință, pentru a proteja mediul înconjurător, industria construcțiilor trebuie să se alinieze la standardele de dezvoltare sustenabilă și Economie Circulară, prin realizarea de materiale de construcții alternative, prietenoase cu mediul înconjurător. Lucrarea de față are ca obiect de studiu realizarea unui beton ecologic (geopolimer) pe bază de lianți minerali activați alcalin, care nu conține ciment Portland, o sursă masivă de poluare.

1.2. Încadrarea temei în preocupările internaționale și naționale

Industria construcțiilor prezintă cea mai rapidă dezvoltare din lume. Prezentele statistici mondiale au arătat că 260.000.000 de tone de ciment sunt necesare anual [1].

Conform lui Davidovits (1994) [2], industria de ciment este responsabilă pentru producerea emisiilor de CO_2 , deoarece, pentru producerea unei tone de ciment Portland, aproximativ o tonă de CO_2 este degajată în atmosferă, ducând la poluarea atmosferei.

În prezent, la nivel mondial s-a pus problema protecției mediului înconjurător. De-a lungul timpului, resursele de energie și bogățiile subsolului au fost afectate, preconizându-se, într-un viitor apropiat, epuizarea rapidă a unora dintre ele, iar unele condiții esențiale vieții, cum ar fi apa și aerul, prezintă semne de otrăvire.

Pentru a proteja mediul înconjurător, industria construcțiilor trebuie să se alinieze la standardele de dezvoltare sustenabilă și economie circulară prin realizarea de materiale durabile, utilizând ca materie primă deșeuri industriale. O alternativă la betonul tradițional cu ciment Portland o reprezintă betoanele geopolimere.

La nivel mondial, geopolimerii au constituit obiect de interes pentru numeroși cercetători, printre care cei mai cunoscuți sunt: Davidovits, Hardjito, Rangan, Palomo, Fernandez-Jimenez etc. La nivel național, aceștia au început să fie studiați la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași de către Burduhos-Nergis D. D., la Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, de către Spătaru I., și la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, de către Lăzărescu A. V.

1.3. Titlul tezei, premisele și obiectivele cercetării

Tema prezentei cercetări este de foarte mare actualitate privind economia circulară și protecția mediului, prin realizarea unor materiale noi, inovative, de viitor. Titlul tezei de doctorat este *“Beton ecologic pe bază de lianți minerali, activați alcalin”*.

Teza de doctorat abordează realizarea unui “beton verde”, ecologic, pe bază de lianți minerali activați alcalin, care nu folosește ciment Portland, ca o alternativă la betonul

tradițional. Acest beton este realizat din deșeuri industriale bogate în siliciu și aluminiu, precum cenușa zburătoare generată de termocentrale, zgura de furnal sau praful de marmură, care, activate alcalin, cu ajutorul unei soluții pe bază de hidroxid de sodiu și silicat de sodiu, produc o reacție de geopolimerizare, ducând la întărirea materialului și realizarea betonului geopolimer. O proprietate a betoanelor geopolimere o reprezintă întărirea rapidă a acestora, ajungând la 90% din rezistența la compresiune după șapte zile, comparativ cu un beton tradițional cu ciment Portland, care ajunge la maturitate din punct de vedere al rezistenței doar la vârsta de 28 de zile.

Metodologia de cercetare necesară producerii betonului geopolimer activat alcalin a avut la bază, pe lângă identificarea metodologiilor prezentate în literatura de specialitate, un program de cercetare coerent, care a presupus o analiză de tip trial-and-error în vederea stabilirii propriei metodologii pentru producerea acestor tipuri de materiale.

Acest beton este realizat utilizând ca materii prime deșeuri industriale (din țara noastră) bogate în siliciu și aluminiu, care, activate alcalin cu ajutorul unei amestec de soluții de hidroxid de sodiu și silicat de sodiu, produc o reacție de geopolimerizare, ducând la întărirea materialului. Prin adaosul de agregate sort 0-8 mm se realizează betonul geopolimer. Lianții și betoanele ecologice au fost realizate prin două metode, și anume: cu un tratament termic (70°C, 24H) sau fără tratament termic (temperatură ambientală 23°C).

Costul de realizare al betoanelor geopolimere variază în funcție de materiile prime care sunt utilizate și de concentrația soluției alcaline folosite. Astfel, scopul este de a realiza betoane geopolimere cu proprietăți mecanice foarte bune, mai convenabile, prin descoperirea unei materii prime ieftine, bogate în Si și Al, utilizând o concentrație cât mai mică a activatorului alcalin.

Documentația necesară proiectului de cercetare a fost obținută cu sprijinul coordonatorului de doctorat, a membrilor comisiei, prin accesul la biblioteca Universității Tehnice, cât și prin accesul la baze de date internaționale.

Activitatea de cercetare s-a realizat în cadrul laboratorului INCD URBAN INCERC Sucursala Cluj-Napoca cât și laboratoarele Universității Tehnice din Cluj-Napoca.

După identificarea și analiza materiilor prime locale, s-a trecut la realizarea rețetelor de lianților ecologici. Pe baza literaturii de specialitate, s-au realizat paste geopolimere activate alcalin pe bază de cenușă zburătoare, care au fost considerate ca probe martor. De asemenea, au fost realizate paste geopolimere prin substituirea cenușii zburătoare în proporție de 10%, 25% și 50% cu zgură de furnal, zgură de aluminiu sau praf de marmură, toate fiind deșeuri/subproduse industriale și caracterizate de o compoziție oxidică și minerală propice dezvoltării reacției de geopolimerizare. În realizarea pastelor geopolimere cu diferite adaosuri și procente la cenușa zburătoare, s-a utilizat trioxidul de fier, oxid de siliciu, oxid de magneziu și hidroxid de calciu. Pe baza rezultatelor la compresiune la vârsta de 7 zile a lianților cu și fără substituție și cu diferite adaosuri, s-au ales rețetele cu cele mai bune rezultate. S-a realizat, astfel, betonul ecologic pe bază de liant mineral prin adaosul de agregate la paste geopolimere cu cele mai bune rezistențe la compresiune.

Lianții și betonul ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin au fost realizați prin două metode și anume: cu un tratament termic (70°C, 24H) sau fără tratament termic (temperatură ambientală de 23°C).

Pentru asigurarea unui parcurs științific coerent, în cadrul programului de cercetare s-au elaborat patru rapoarte de cercetare științifică (rapoarte de progres), care au fost susținute în fața conducătorului de doctorat și a comisiei de îndrumare.

1.4. Conținutul tezei de doctorat

Teza de față este structurată în 7 capitole, care vor fi prezentate succint în cele ce urmează:

Capitolul 1, introductiv, justifică abordarea temei și încadrarea acesteia în preocupările internaționale și naționale, și prezintă structura lucrării.

Capitolul 2 face referire la stadiul actual al cercetărilor în ceea ce privește liantul/betonul geopolimer cu diferite materii prime, substituții și adaosuri, raportat la diverși cercetători (Davidovits, Temuujin, Baykara, Allahverdi, Anuar etc.).

Capitolul 3 discută obiectivele propuse în realizarea tezei de doctorat: identificarea materiilor prime, stabilirea activatorilor alcalini și a raportului dintre soluția de silicat de sodiu și hidroxid de sodiu, realizarea lianților ecologici și a betonului ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin prin două metode (cu tratament termic la 70°C, 24H și la temperatură ambientală de 23°C).

Capitolul 4 prezintă metodologia generală de realizare a lianților și betoanelor ecologice pe bază de lianți minerali activați alcalin și aparatura folosită în realizarea și testarea acestora.

În **Capitolul 5** se supun atenției rezultatele cercetărilor în ceea ce privește obținerea liantului ecologic activat alcalin pe bază de cenușă zburătoare, prin substituirea cenușii zburătoare cu praf de marmură și zgură de furnal în proporție de 10%, 25% și 50% sau cu zgură de aluminiu în proporție de 25%. De asemenea, tot în acest capitol sunt prezentate performanțele fizico-mecanice a lianților ecologici realizați prin introducerea diferitelor adaosuri în amestecul de materii prime precum trioxid de fier, oxid de calciu, dioxid de siliciu, oxid de magneziu și perlit. Lianții ecologici au fost obținuți prin două metode cu tratament termic (70°C, 24h) și fără tratament termic (temperatură ambientală 23°C).

Capitolul 6 prezintă realizarea betonului ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalini cu substituție a cenușii zburătoare cu praf de marmură în procente de 10 și 25%, precum și rezultatele obținute în urma încercărilor efectuate. Betoanele ecologice au fost realizate atât cu tratament termic (70°C, 24h), cât și fără tratament termic.

În **Capitolul 7** sunt centralizate concluziile bazate pe rezultatele obținute în urma cercetării precum și contribuția personală a autorului.

CONTRIBUȚIE PERSONALĂ

3. Ipoteza de lucru

În ceea ce privește modul de realizare a materialelor geopolimere la nivel mondial, unele lucruri sunt cunoscute cum ar fi că materiile prime utilizate trebuie să fie bogate în siliciu și aluminiu iar cei mai folosiți activatori alcalini utilizați sunt pe bază de Na_2SiO_3 și NaOH , dar există și numeroase controverse în ceea ce privește concentrația molară a soluției de NaOH , temperatura și durata tratamentului termic precum și raportul optim între $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$.

4. Metodologia de cercetare

Metodologia generală a constat într-o cercetare teoretică și una experimentală. Cercetarea teoretică s-a realizat pe baza analizei și sintezei a peste 200 de referințe bibliografice.

Cercetarea experimentală prezentată în această teză de doctorat s-a desfășurat atât în cadrul laboratorului INCD-URBAN-INCERC, sucursala Cluj-Napoca, precum și în diferite laboratoare din cadrul Universității Tehnice Cluj-Napoca.

Programul experimental a constat în:

- identificarea materiilor prime locale bogate în Si și Al
- identificarea potențialilor substituenți ai cenușii zburătoare și posibilele adaosuri utilizate.
- identificarea tipurilor de activatori alcalini și raportul dintre aceștia
- identificarea molarității soluției de NaOH
- identificarea și stabilirea modului de realizare a geopolimerilor cu sau fără tratament termic, precum și stabilirea temperaturii tratamentului termic și durata acestuia.
- identificarea metodelor de testare
- teste experimentale pe materii prime: analiza și caracterizarea materiilor prime locale ce urmează a fi utilizate la obținerea pasteii/betonului ecologic (parametrii urmăriți: aspect, compoziție, masă volumică, distribuție granulometrică)
- realizarea de lianți ecologici cu sau fără tratament termic, cu substituție a cenușii zburătoare sau cu diferite adaosuri
- realizarea de beton ecologic pe bază de liant mineral activat alcalin
- teste experimentale pe liant și beton ecologic pe bază de liant mineral activat alcalin, în vederea stabilirii influenței materiilor prime, parametrilor compoziționali și ai celor tehnologici asupra performanțelor liantului și betonului.

Pentru realizarea liantului și a betonului ecologic, efectuarea testelor fizico-mecanice, analiza în infraroșu cu transformată Fourier (FTIR), evaluarea microscopică și evaluarea compozițională prin metoda difracției cu raze x (XRD) s-au utilizat diferite echipamente precum malaxor cu paletă, balanțe analitice și hidrostactice, etuve termoreglabile, set de site, mașină de încercare a rezistenței la încovoiere și la compresiune de tip digital, aparat Jasko FT/IR -6200 Fourier Infrared Spectrometer, presă de 5 bari cu vid, stereomicroscop optic și aparat de difracție cu raze X. De asemenea, s-au mai folosit tipare metalice, cilindri gradați, pahare berzelius, mojar, baghete de sticlă etc.

Materiile prime utilizate în realizarea lianților și betoanelor ecologice au fost de origine autohtonă, pentru a studia posibilitatea de realizare a acestui tip de material în țara noastră.

5. Liant ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin (pasta geopolimeră)

5.2. Obiective

Obiectivele acestui capitol se referă la cercetările preliminare pentru realizarea lianților ecologici activați alcalin, proiectarea și realizarea acestora cu diferite substituții ale cenușii zburătoare sau cu diferite adaosuri, precum și caracterizarea acestora.

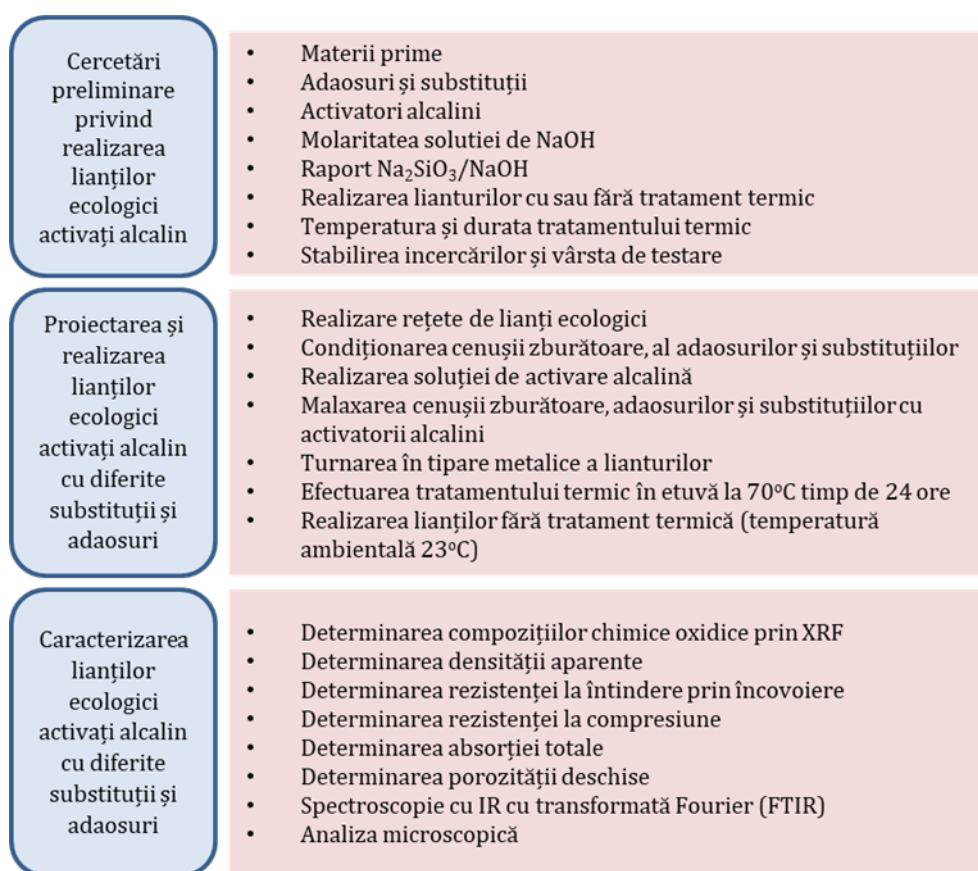


Fig. 5.1. Metodologia de cercetare a lianților ecologici activați alcalin și etapele parcurse

5.3.1.2. Stabilirea substituienților cenușii zburătoare și a adaosurilor

Pentru a putea realiza un liant ecologic, s-a urmărit identificarea unor materii prime din deșeuri industriale autohtone, bogate în Si și Al, care să poată genera reacția de geopolimerizare și a crea materiale rezistente și durabile, comparabile cu betonul tradițional care utilizează ciment Portland.

Cenușa zburătoare (F.A.) utilizată în realizarea lianților ecologici activați alcalin a fost obținută de la Termocentrala Rovinari.

Pe baza rețetelor de lianți ecologici activați alcalini pe bază de cenușă zburătoare, s-au realizat rețete derivate prin substituirea cenușii zburătoare în procente de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură (rețetele R9÷20) și zgură de furnal (rețetele R34÷36).

Praful de marmură (M.D.) utilizat în studiu s-a obținut din prelucrarea marmurei de Ruschița, prin tăiere, și este de culoare albă.

Zgura de furnal este de proveniență autohtonă.

Tot în această cercetare a fost studiată influența diferitelor materii prime utilizate ca adaos la rețeta de bază a pastei geopolimere activate alcalin pe bază de cenușă zburătoare.

Zgura de Aluminiu este obținută din prelucrarea deșeurilor.

Perlitul este obținut din măcinarea granulelor de perlit achiziționat din comerț.

Trioxidul de fier, SiO_2 , Ca(OH)_2 și MgO au fost achiziționate din comerț.

5.3.1.3. Stabilirea activatorilor alcalini și a molarității soluției de NaOH

Conform literaturii de specialitate, cei mai frecvenți activatori alcalini sunt silicatul de sodiu și hidroxidul de sodiu. Astfel, s-a optat pentru o soluție de activare alcalină realizată prin amestecarea silicatului de sodiu cu un hidroxid de sodiu de diferite molarități. Concentrația molară a soluțiilor de NaOH utilizate în realizarea lianților ecologici a fost de 6M, 8M și 10M.

5.3.1.4. Stabilirea raportului dintre $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

De asemenea, pe acești lianți ecologici au fost studiate influența raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ asupra proprietăților fizico-mecanice. S-au utilizat în studiu diferite rapoarte $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1; 1,5; 2$ și $2,5$, realizate la molarități diferite 8M (Rețetele R1, R2, R3 și R4) și 10M (Rețetele R5, R6, R7 și R8).

5.3.1.5. Stabilirea modului de realizare a lianților ecologici cu / fără tratament termic. Temperatura și durata tratamentului termic.

Studiind literatura de specialitate, unde se prezintă posibilitatea de realizare a pastelor geopolimere cu sau fără tratament termic, o parte dintre rețete au fost realizate cu un tratament termic de 24h la 70°C , iar altele au fost efectuate fără tratament termic, la o temperatură de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Probele realizate prin cele două metode cu/fără tratament au fost comparate între ele pentru a putea studia influența tratamentului termic asupra rezistențelor mecanice și a putea fi comparate cu literatura de specialitate inclusiv temperatura tratamentului termic a fost aleasă pe baza studiilor existente.

5.3.1.6. Stabilirea încercărilor și vârstele de testare

Vârstele de testare a pastelor geopolimere activate alcalin au fost de 7, 14 și 28 zile.

S-au realizat un număr de 68 de rețete de lianți ecologici activați alcalin din care 50 au fost supuși unui tratament termic (70°C , 24h) iar 18 au fost realizați fără tratament termic (temperatură ambientală (23°C)).

5.4. Rezultate

S-au realizat un număr de 68 de rețete de paste geopolimere activate alcalin din care:

- 9 pe bază de cenușă zburătoare (R1÷R8; R21),
- 26 de rețete prin substituirea cenușii zburătoare cu diferite materii prime:
 - 15 rețete prin substituirea cenușii zburătoare în procente de 10%, 25%, 50% cu praf de marmură (R9÷R20, R53TT÷R55FTT)
 - 6 rețete prin substituirea cenușii zburătoare în procente de 10%, 25%, 50% cu zgură de furnal (R34÷R36, R34FTT÷R36FTT),

- 3 rețete prin substituție de 5% și 25% cu perlit și praf de marmură (R1P, R2P, R3P)
- 2 rețete cu substituție de 25% cu zgură de aluminiu (R33-1, R33-2).
- 33 de rețete cu diferite adaosuri și procente
 - Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 R22, R23, R24
 - Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 și zgură de aluminiu R25, R26, R27
 - Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 și perlit R28
 - Adaos de SiO_2 și trioxid de fier Fe_2O_3 R29, R30, R31
 - Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO și $\text{Ca}(\text{OH})_2$ R37, R45, R46, R47, R45FTT, R46FTT, R47FTT
 - Adaos de SiO_2 și $\text{Ca}(\text{OH})_2$ R42, R43, R44, R48, R49, R50, R51, R52, R42FTT, R43FTT, R44FTT, R48FTT, R49FTT, R50FTT, R51FTT, R52FTT

Dintre acestea, 18 rețete de paste geopolimere au fost realizate fără tratament termic (23°C), atât cu adaos, cât și cu substituirea cenușii zburătoare.

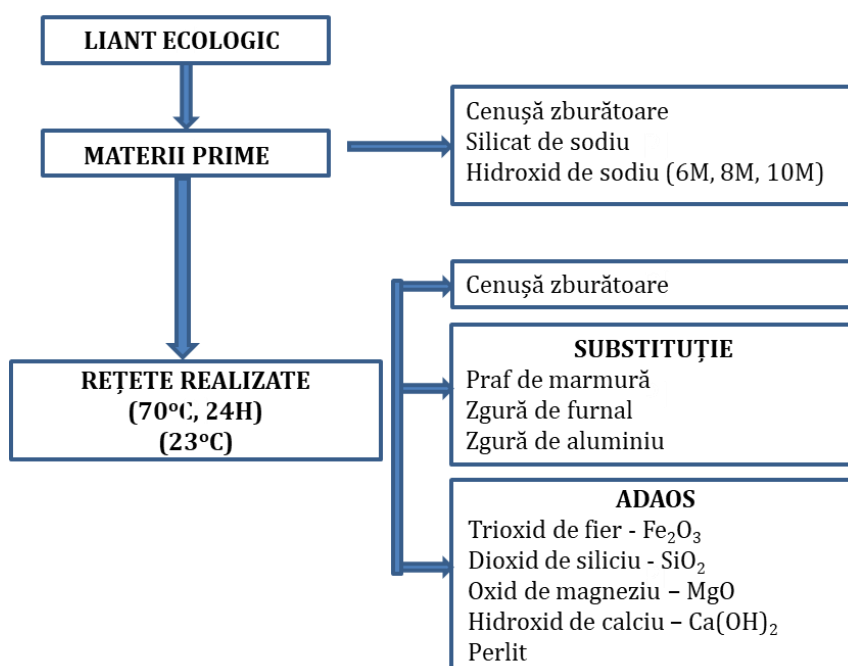


Fig. 5.21. Liant ecologic activat alcalin realizat

Rețetele de lianți ecologici activați alcalin realizate pe bază de cenușă zburătoare, considerate ca probe martor pentru cele cu substituții și adaosuri sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Tabel 5.4. Rețete de lianți ecologici pe bază de cenușă zburătoare

Rețeta	Soluție NaOH	Cenușă zburătoare		Activator alcalin soluție de		Total soluție activator alcalin (A.A.)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	AA/FA
				Na_2SiO_3	NaOH			
Nr.	M	%	g	g	g	g	-	-
R1	8	100	800	310	310	620	1,0	0,78
R2	8	100	800	372	248	620	1,5	0,78
R3	8	100	800	414	206	620	2,0	0,78
R4	8	100	800	443	177	620	2,5	0,78
R5	10	100	800	310	310	620	1,0	0,78
R6	10	100	800	372	248	620	1,5	0,78
R7	10	100	800	414	206	620	2,0	0,78
R8	10	100	800	443	177	620	2,5	0,78
R21	6	100	800	414	206	620	2,0	0,78

S-au realizat paste geopolimere prin substituirea cenușii zburătoare în proporție de 10, 25 și 50% cu deșeuri industriale, precum praf de marmură și zgură de furnal.

Tabel 5.5. Rețete de liant ecologic cu substituție a cenușii zburătoare cu praf de marmură în proporții

Rețeta	NaOH	Cenușă zburătoare (F.A.)		Praf de marmură (M.D.)		F.A. + M.D.	Activator alcalin soluție de $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}(8\text{M})$		Total activator alcalin soluție	Raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Activator alcalin soluție (F.A. + M.D.)
-		%	g	%	g	g	g	g	g	-	g
TRATAMENT TERMIC (70°C, 24h)											
R9	8	90	720	10	80	800	443	177	620	2,5	0,78
R10	8	75	600	25	200	800	443	177	620	2,5	0,78
R11	8	50	400	50	400	800	443	177	620	2,5	0,78
R12	8	90	720	10	80	800	414	206	620	2	0,78
R13	8	75	600	25	200	800	414	206	620	2	0,78
R14	8	50	400	50	400	800	414	206	620	2	0,78
R15	8	90	720	10	80	800	372	248	620	1,5	0,78
R16	8	75	600	25	200	800	372	248	620	1,5	0,78
R17	8	50	400	50	400	800	372	248	620	1,5	0,78
R18	8	90	720	10	80	800	310	310	620	1	0,78
R19	8	75	600	25	200	800	310	310	620	1	0,78
R20	8	50	400	50	400	800	310	310	620	1	0,78
FĂRĂ TRATAMENT TERMIC (23÷2°C)											
R53 FTT	8	90	720	10	80	800	443	177	620	2,5	0,78
R54 FTT	8	75	600	25	200	800	443	177	620	2,5	0,78
R55 FTT	8	50	400	50	400	800	443	177	620	2,5	0,78

Tabel 5.6. Rețete de liant ecologic cu substituție a cenușii zburătoare cu zgură de furnal

Rețeta	NaOH	Cenușă zburătoare (F.A.)		Zgură de furnal (B.F.S.)		F.A.+B.F.S.	Activator alcalin soluție de $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}(8\text{M})$		Total activator alcalin soluție	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	AA (F.A.+B.F.S.)
-	M	%	g	%	g	g	g	g	g	-	g
TRATAMENT TERMIC (70°C, 24h)											
R34	8	90	720	10	80	800	443	177	620	2,5	0,78
R35	8	75	600	25	200	800	443	177	620	2,5	0,78
R36	8	50	400	50	400	800	443	177	620	2,5	0,78
FĂRĂ TRATAMENT TERMIC (23÷2°C)											
R34FTT	8	90	720	10	80	800	443	177	620	2,5	0,78
R35FTT	8	75	600	25	200	800	443	177	620	2,5	0,78
R36FTT	8	50	400	50	400	800	443	177	620	2,5	0,78

Tabel 5.14. Rețete de liant ecologic cu substituție a cenușii zburătoare cu praf de marmură și perlit

Rețeta	F.A.		P.		M.D.		$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	AA/(F.A.+P.+M.D.)
Nr.	%	g	%	g	%	g	-	g
R4	100	800	0	0	0	0	2,5	0,78
R1P	95	760	5	40	0	0		
R2P	90	720	5	40	5	40		
R3P	50	400	25	200	25	200		

Lianții ecologici s-au realizat și cu diferite adaosuri, precum Fe_2O_3 , SiO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MgO , perlit sau zgură de aluminiu în diferite procente. Aceștia au fost realizați utilizând o soluție de

hidroxid de sodiu cu o concentrație 6M și un raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$, fiind realizați cu un tratament termic (70°C, 24h), iar o parte dintre ei au fost realizați la o temperatură ambientală de 23°C.

Tabel 5.7. Liant ecologic realizat cu diferite adaosuri și procente

Rețeta	Soluție NaOH	$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}}$	FA	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	Ca(OH)_2	Zgură Al	Perlit	70°C, 24H	23±2°C
Nr.	M	-	%	%	%	%	%	%	%	-	-
R21	6	2	100	0	-	-	-	-	-	X	-
R22	6	2	100	1	-	-	-	-	-	X	-
R23	6	2	100	5	-	-	-	-	-	X	-
R24	6	2	100	10	-	-	-	-	-	X	-
R25	6	2	100	1	-	-	-	1	-	X	-
R26	6	2	100	1	-	-	-	5	-	X	-
R27	6	2	100	1	-	-	-	10	-	X	-
R28	6	2	100	1	-	-	-	-	1	X	-
R29	6	2	100	-	34	-	-	-	-	X	-
R30	6	2	100	1	34	-	-	-	-	X	-
R31	6	2	100	10	34	-	-	-	-	X	-
R32	6	2	100	10	34	-	-	-	-	X	-
R37	6	2	100	0,4	24,3	3,4	-	-	-	X	-
R38	6	2	100	2,3	24,3	20,2	-	-	-	X	-
R39	6	2	100	-	-	-	-	-	-	X	-
R40	6	2	100	1,1	24,3	10,1	-	-	-	X	-
R41	6	2	100	-	24,3	-	5	-	-	X	X
R42	6	2	100	-	24,3	-	5	-	-	X	X
R43	6	2	100	-	24,3	-	10	-	-	X	X
R44	6	2	100	-	24,3	-	20	-	-	X	X
R45	6	2	100	-	24,3	-	6,2	-	-	X	X
R46	6	2	100	0,4	24,3	3,4	5	-	-	X	X
R47	6	2	100	0,4	24,3	3,4	10	-	-	X	X
R48	6	2	100	0,4	24,3	3,4	20	-	-	X	X
R49	6	2	100	-	24,3	-	7,5	-	-	X	X
R50	6	2	100	-	24,3	-	8,7	-	-	X	X
R51	6	2	100	-	24,3	-	11,2	-	-	X	X
R52	6	2	100	-	24,3	-	12,5	-	-	X	X

Cenușa zburătoare și substituienții/adaosurile utilizate au fost condiționate în laborator în prealabil cu minim 24 ore, la o temperatură de 23±2°C. S-a trecut la cântărirea cenușii și a substituienților/ adaosurilor, precum și a soluțiilor de activatori alcalini în raportul dorit.

Malaxarea cenușii și a substituienților/adaosurilor utilizate, a avut loc timp de cca. 60 s pentru o omogenizare completă, cu ajutorul unui malaxor cu paletă, utilizat la realizarea mortarelor în laboratoarele de încercare.

Ulterior, după malaxarea materiilor prime solide, s-a turnat treptat soluția de activator alcalin într-un interval de 70s, la o viteză mică, la început. O turnare prea bruscă a activatorului alcalin poate duce la efectul de flesh setting (întărire rapidă – bruscă a pastei geopolimere). Malaxarea activatorilor alcalini cu materiile prime solide s-a făcut timp de cca. 2.5-3 min.

S-a determinat densitatea pastei în stare proaspătă cu ajutorul unor recipiente cu volum cunoscut și a unei balanțe analitice.

Turnarea epruvetelor s-a făcut în tipare prismatice, după ce, în prealabil, au fost date cu decofrol. Tiparele cu epruvetele prismatice cu dimensiunile de 40x40x160 mm au fost supuse unui

tratament termic de 70°C, timp de 24 ore, cu ajutorul unei etuve termoreglabile de laborator sau au fost lăsate în camera de condiționare la o temperatură de (23±2°C), în cazul celor realizate fără tratament termic.

După efectuarea tratamentului termic și a decofrării epruvetelor prismatice s-a obținut densitatea acestora prin determinarea dimensiunilor și prin cântărire cu ajutorul balanței analitice.

Epruvetele realizate au fost puse la condiționat timp de 6 zile în condiții de laborator ($t=23\pm 2$, U.R.A.=50%), după care s-a determinat densitatea la vârsta de 7 zile și s-au efectuat determinări fizico-mecanice. S-au mai obținut rezistența la întindere prin încovoiere și rezistența la compresiune, cele mai utilizate încercări conform literaturii de specialitate, precum și absorbția totală de apă și porozitatea deschisă pentru unele dintre acestea.

5.5. Discuții

5.5.1. Determinarea densității aparente

5.5.1.1. Liant ecologic pe bază de cenușă zburătoare

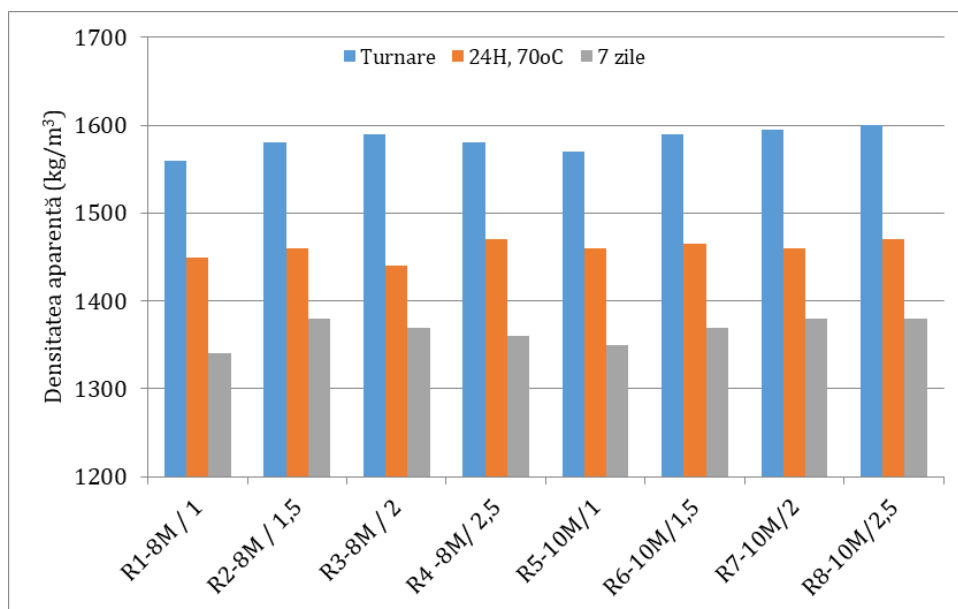


Fig. 5.22. Densitatea aparentă a liantului ecologic cu diferite molarități și rapoarte $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

5.5.1.2. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură

❖ Cu tratament termic

Tabel 5.8. Densitatea aparentă în stare proaspătă a liantului ecologic cu substituție praf de marmură

Materii prime	Molaritate	Raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$			
	8M	2.5	2	1.5	1
	Rețeta	Densitate proaspătă			
%	Nr.	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
F.A. 100%	R4/R3/R2/R1	1580	1590	1580	1560
F.A. 90% + 10% M.D.	R9/R12/R15/R18	1680	1680	1670	1640
F.A. 75% + 25% M.D.	R10/R13/R16/R19	1710	1720	1720	1650
F.A. 50% + 50% M.D.	R11/R14/R17/R20	1750	1800	1670	1750

Tabel 5.9. Densitatea aparentă a liantului ecologic cu substituție de praf de marmură după tratament termic

Materii prime	Rețeta	$\rho_{24h, 70^{\circ}C}$			
%	Nr.	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
F.A. 100%	R4/R3/R2/R1	1470	1440	1460	1450
F.A. 90% + 10% M.D.	R9/R12/R15/R18	1570	1570	1630	1560
F.A. 75% + 25% M.D.	R10/R13/R16/R19	1620	1600	1640	1640
F.A. 50% + 50% M.D.	R11/R14/R17/R20	1740	1740	1750	1670

Tabel 5.10. Densitatea aparentă a liantului ecologic cu substituție de praf de marmură la 7 zile

Materii prime	Rețeta	$\rho_{7 \text{ zile}}$			
%	Nr.	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
F.A. 100%	R4/R3/R2/R1	1360	1370	1380	1340
F.A. 90% + 10% M.D.	R9/R12/R15/R18	1550	1510	1530	1520
F.A. 75% + 25% M.D.	R10/R13/R16/R19	1580	1550	1570	1580
F.A. 50% + 50% M.D.	R11/R14/R17/R20	1670	1680	1670	1650

❖ **Fără tratament termic**

Tabel 5.11. Densitatea aparentă a liantului ecologic cu substituție praf de marmură, fără tratament termic

Materii prime	Rețeta	Turnare	7 zile	14 zile	28 zile
%	Nr.	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
F.A. 90% + 10% M.D.	R53FTT	1680	1620	1560	1550
F.A. 75% + 25% M.D.	R54FTT	1710	1700	1650	1580
F.A. 50% + 50% M.D.	R55FTT	1750	1740	1720	1650

5.5.1.3. Liant ecologic realizat prin substituțirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu zgură de furnal

Tabel 5.12. Densitatea aparentă a liantului ecologic cu substituție zgură de furnal

Molaritate 8M și raport Raport Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2,5					
TRATAMENT TERMIC (70°C, 24h)					
Materii prime	Rețeta	Turnare	24H, 70°C	7 zile	
%	Nr.	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	
F.A. 100%	R4	1580	1470	1360	
F.A. 90% + 10% B.F.S.	R34	1620	1550	1460	
F.A. 75% + 25% B.F.S.	R35	1650	1570	1520	
F.A. 50% + 50% B.F.S.	R36	1730	1710	1630	
FĂRĂ TRATAMENT TERMIC (22°C)					
Materii prime	Rețeta	ρ turnare	ρ 7zile	ρ 14zile	ρ 28zile
%	Nr.	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
F.A. 90% + 10% B.F.S.	R34FTT	1620	1615	1610	1610
F.A. 75% + 25% B.F.S.	R35FTT	1650	1640	1630	1620
F.A. 50% + 50% B.F.S.	R36FTT	1730	1700	1680	1630

5.5.1.4. Liant ecologic realizat prin substituțirea cenușii zburătoare cu perlit și praf de marmură

Tabel 5.15. Densitatea aparentă a compozițiilor R1P, R2P și R3P

Rețeta	F.A.	Perlit	M.D.	ρ_{turnare}	$\rho_{70^{\circ}C, 24h}$	$\rho_{7 \text{ zile}}$
Nr.	%	%	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
R4	100	0	0	1580	1470	1360
R1P	95	5	0	1480	1410	1330
R2P	90	5	5	1580	1440	1360
R3P	50	25	25	1680	1540	1500

5.5.1.5. Liant ecologic realizat cu diferite adaosuri și procente la cenușa zburătoare

❖ *Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3*

Tabel 5.18. Densitatea aparentă a compozițiilor R21, R22, R23 și R24

Rețeta	F.A.	Fe_2O_3	$Na_2SiO_3/NaOH$	ρ turnare	$\rho_{24h, 70^\circ C}$	ρ_{7zile}
Nr.	%	%	-	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
R21	100	0	2	1580	1380	1290
R22	100	1		1620	1390	1330
R23	100	5		1640	1450	1350
R24	100	10		1670	1510	1380

❖ *Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 și zgură de aluminiu*

Tabel 5.20. Densitatea aparentă a compozitelor R25, R26 și R27

Rețeta	F.A.	Fe_2O_3	Zgură Al	$Na_2SiO_3/NaOH$	ρ turnare	$\rho_{24h, 70^\circ C}$	ρ_{7zile}
Nr.	%	%	%	-	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
R25	100	1	1	2	1610	1370	1260
R26	100	1	5		1580	1110	1050
R27	100	1	10		1590	930	880

❖ *Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 și perlit*

Tabel 5.22. Densitatea aparentă a liantului R28

Rețeta	F.A.	Fe_2O_3	Perlit	$Na_2SiO_3/NaOH$	ρ turnare	$\rho_{24h, 70^\circ C}$	ρ_{7zile}
Nr.	%	%	%	-	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
R28	100	1	1	2	1640	1120	1030

❖ *Adaos de SiO_2 și trioxid de fier Fe_2O_3*

Tabel 5.24. Densitățile aparente ale compozițiilor R29, R30 și R31

Rețeta	F.A.	Fe_2O_3	SiO_2	$Na_2SiO_3/NaOH$	ρ turnare	$\rho_{24h, 70^\circ C}$	ρ_{7zile}	ρ_{14zile}	ρ_{28zile}
Nr.	%	%	%	-	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
R29	100	0	34	2	1540	1490	1370	1300	1260
R30	100	1	34		1580	1460	1400	1350	1300
R31	100	10	34		1570	1530	1440	1420	1410

❖ *Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO și $Ca(OH)_2$*

Tabel 5.26. Densitățile aparente a lianților ecologici cu adaos de Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO și $Ca(OH)_2$

Rețeta	F.A.	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	$Ca(OH)_2$	ρ turnare	$\rho_{24h, 70^\circ C}$	ρ_{7zile}	ρ_{14zile}
Nr.	%	%	%	%	%	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
TRATAMENT TERMIC (70°C, 24h)									
R37	100	0,37	24,34	3,37	0	1620	1530	1400	1290
R45	100	0,37	24,34	3,37	5	1670	1580	1540	1500
R46	100	0,37	24,34	3,37	10	1520	1490	1400	1340
R47	100	0,37	24,34	3,37	20	1510	1500	1360	1330
FĂRĂ TRATAMENT TERMIC (22°C)									
R45FTT	100	0,37	24,34	3,37	5	1670	-	1600	-
R46FTT	100	0,37	24,34	3,37	10	1520	-	1570	-
R47FTT	100	0,37	24,34	3,37	20	1510	-	1550	-

❖ **Adaos de SiO_2 și Ca(OH)_2**

Tabel 5.28. Densitățile aparente a compozitelor cu adaos de SiO_2 și Ca(OH)_2

Rețeta	F.A.	SiO_2	Ca(OH)_2	ρ_{turnare}	$\rho_{24\text{h}, 70^\circ\text{C}}$	$\rho_{7\text{ zile}}$	$\rho_{14\text{ zile}}$	$\rho_{28\text{ zile}}$
Nr.	%	%	%	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3	Kg/m^3
TRATAMENT TERMIC (70°C , 24h)								
R42	100	24,3	5,0	1650	1580	1500	1460	1440
R48	100	24,3	6,2	1590	1580	1560	1520	1500
R49	100	24,3	7,5	1590	1550	1540	1530	1490
R50	100	24,3	8,7	1600	1530	1500	1460	1450
R43	100	24,3	10,0	1570	1540	1510	1480	1460
R51	100	24,3	11,2	1480	1460	1450	1420	1410
R52	100	24,3	12,5	1400	1490	1300	1280	1230
R44	100	24,3	20,0	1510	1510	1510	1450	1480
FĂRĂ TRATAMENT TERMIC (22°C)								
R42 FTT	100	24,3	5,0	1650	-	-	1600	-
R48 FTT	100	24,3	6,2	1590	-	-	1580	-
R49 FTT	100	24,3	7,5	1590	-	-	1570	-
R50 FTT	100	24,3	8,7	1600	-	-	1500	-
R43 FTT	100	24,3	10,0	1570	-	-	1470	-
R51 FTT	100	24,3	11,2	1480	-	-	1370	-
R52 FTT	100	24,3	12,5	1400	-	-	1310	-
R44 FTT	100	24,3	20,0	1510	-	-	1300	-

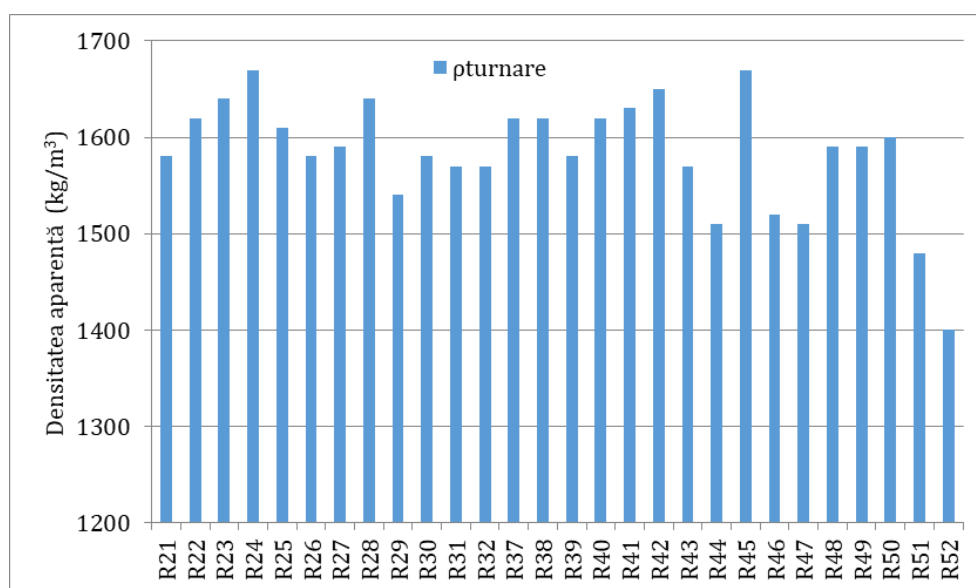


Fig. 5.39. Densitățile aparente în stare proaspătă a lianților ecologici activați alcalin cu diferite adaosuri

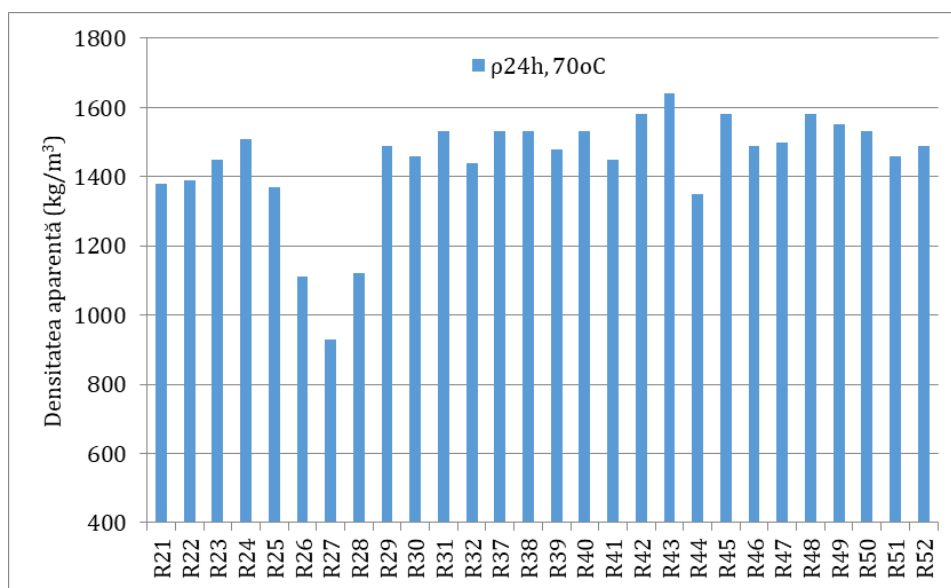


Fig. 5.40. Densitățile aparente a lianților ecologici activați alcalin cu diferite adaosuri după tratament termic

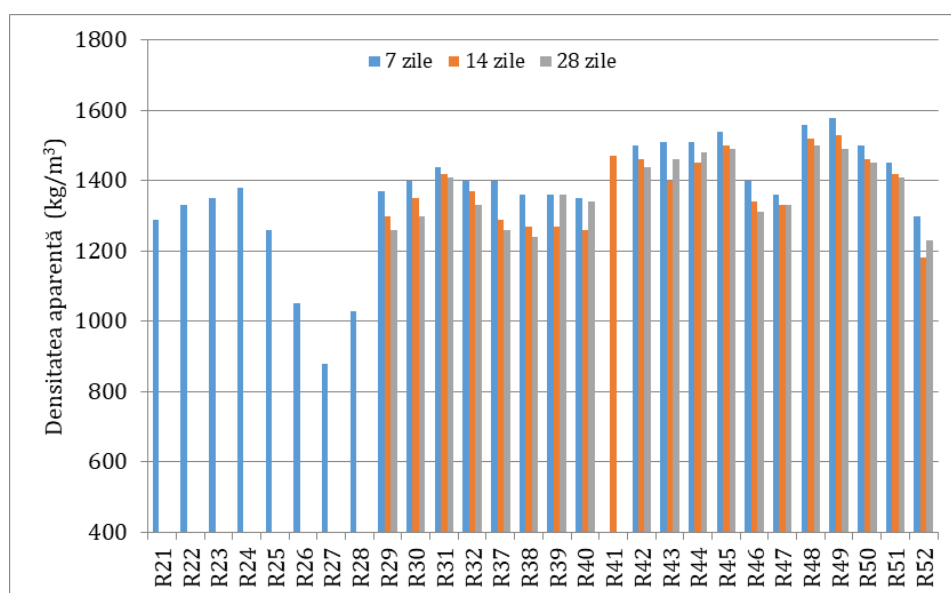


Fig. 5.41. Densitățile aparente a lianților ecologici activați alcalin cu diferite adaosuri după tratament termic

5.5.2. Rezistența la întindere prin încovoiere

5.5.2.1. Liant ecologic pe bază de cenușă zburătoare

Rezistența la întindere prin încovoiere pentru pasta geopolimeră realizată cu o soluție NaOH de concentrație 8M a variat între 2,49 N/mm² pentru rețeta R2 și 3,45 N/mm² pentru rețeta R4. Se observă că rezistențele la întindere prin încovoiere au crescut liniar, odată cu creșterea raportului activatorului alcalin de la 1,5 la 2,5. Excepție a făcut rețeta R1, care a avut o rezistență mai mare față de rețetele R2 și R3, deși a avut raportul de activator alcalin cel mai mic, și anume Na₂SiO₃ /NaOH=1. Pentru cele realizate cu o soluție NaOH de concentrație 10M rezistența la întindere prin încovoiere a variat între 2,57 N/mm² pentru rețeta R6 și 3,65 N/mm² pentru rețeta R7. S-au obținut valori mai bune pentru lianții ecologici pe bază de cenușă având o concentrație molară mai mare a soluției de NaOH.

5.5.2.2. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură

❖ Cu tratament termic

În raport cu compoziția considerată martor, R4, se observă că, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R9, R10, R11, rezistența la întindere prin încovoiere scade, pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită, excepție făcând compoziția cu o substituție de 25%, care este egală cu cea martor. Astfel, s-au înregistrat scăderi cu 4,1% pentru o substituție de 10% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, respectiv cu 21,4% pentru o substituție de 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

În raport cu compoziția considerată martor, R3, se observă că, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R12, R13, R14, rezistențele la întindere prin încovoiere scad pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită, excepție făcând compoziția cu o substituție de 25%, care a avut o scădere mai mică, și anume 1,3%. Astfel, s-au înregistrat scăderi cu 4,1% pentru o substituție de 10% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, respectiv cu 34,4% pentru o substituție de 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

În raport cu compoziția considerată martor, R2, se observă că, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R15, R16, R17, rezistențele la întindere prin încovoiere scad pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită, excepție făcând compoziția cu o substituție de 10%, care a avut o creștere de 3,2%. Astfel, s-au înregistrat scăderi cu 1,6% pentru o substituție de 25% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, respectiv cu 17,7% pentru o substituție de 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

În raport cu compoziția considerată martor, R1, se observă că, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R18, R19, R20, rezistențele la întindere prin încovoiere scad pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită. Astfel, s-au înregistrat scăderi de 13,8% pentru o substituție de 10% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, respectiv cu 25,4% și 41,9% pentru o substituție de 25% și 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

❖ Fără tratament termic

S-a observat că rezistențele la vârsta de 7 și 28 zile au crescut odată cu creșterea procentului de praf de marmură. La vârsta de 14 zile, rezistența la întindere pentru proba notată R55FTT, deși a avut cel mai mare procent de marmură (50%), a fost mai mic, în comparație cu probele celelalte. De asemenea, s-a observat că rezistențele au crescut odată cu creșterea vârstei de testare de la 7 la 28 zile, excepție făcând proba notată cu R55FTT, având un procent de praf de marmură de 50%, care a avut o valoare mai mică la vârsta de 14 zile. Este posibil ca această rezistență scăzută să fie cauzată de nereacționarea activatorului alcalin în totalitate cu cenușa zburătoare și praful de marmură sau durata malaxării pastei geopolimere să nu fie suficientă, iar epruvetele realizate să nu fie omogene.

Comparând lianții ecologici realizați cu tratament termic cu cei fără tratament termic (TTvsFTT), s-a observat că rezistențele la întindere prin încovoiere la vârsta de 7 zile au fost mai mari pentru cele cu tratament termic, în cazul substituției cu praf de marmură în procente de 10% și 25%. Rezistențele la întindere au avut o scădere de 24,7% și 12,2%. Pasta geopolimeră notată cu R55FTT cu substituție de 50% de praf de marmură, fără tratament termic, a avut o rezistență la întindere prin încovoiere mai mare decât cea realizată cu tratament termic și notată cu R11, dar și față de proba martor R4. Pasta geopolimeră notată cu

R53FTT a avut o creștere cu 19,9% în comparație cu cea notată cu R11, având aceeași substituție de 50% praf de marmură.

5.5.2.3. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu zgură de furnal

Comparând rezultatele obținute pentru aceleași rețete de preparare, în cazul substituiri cenușii zburătoare (F.A.) cu zgură de furnal (B.F.S.), cu și fără tratament termic (T vs. FT), se observă că lipsa tratamentului termic a determinat o reducere a rezistenței la întindere la vârsta de 7 zile, de 29%, pentru proba cu o substituție de 25%, dar și creșteri de 13% și 85% în funcție de cantitatea de cenușă zburătoare substituie (10% și 25%). De asemenea, același lucru se observă și în cazul substituiri cenușii zburătoare (F.A.) cu praf de marmură (M.D.), scăderea rezistența la întindere fiind cuprinsă între 18% și 33%.

5.5.2.5. Liant ecologic realizat cu diferite adaosuri și procente la cenușa zburătoare

❖ *Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3*

Comparativ cu proba considerate martor (R21) s-au înregistrat creșteri cu 7,2% pentru un adaos 1% de trioxid de fier la cenușa zburătoare, cu 30.7%, respectiv cu 33,7 % pentru cazurile de adaos trioxid de fier 5%, respectiv 10% la cenușa zburătoare.

❖ *Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO și $Ca(OH)_2$*

La pastele geopolimere pe bază de Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO și $Ca(OH)_2$ realizate cu tratament termic, rezistențele la întindere prin încovoiere scad odată cu creșterea adaosului de $Ca(OH)_2$.

Comparativ cu probele realizate cu tratament termic, deși pastele geopolimere realizate fără tratament termic au fost fisurate din cauza contracției, au avut rezistențe la întindere mai mari la vârsta de 7 zile, pentru cele cu adaos de 10% și 20% $Ca(OH)_2$.

❖ *Adaos de SiO_2 și $Ca(OH)_2$*

Comparativ cu proba considerată martor, notată cu R22, rezistențele la întindere prin încovoiere la vârsta de 7 zile au crescut pentru pastele geopolimere notate cu R43, R48 și R50. Pentru celelalte paste geopolimere, rezistențele la încovoiere au scăzut. S-a observat că pentru unele paste geopolimere realizate cu tratament termic R49 și R51 rezistențele au crescut odată cu creșterea vârstei de testare de la 7 la 28 zile. Pentru celelalte paste, rezistențele au fluctuat, datorită neomogenității acestora și posibil geopolimerizării parțiale a acestora.

Comparând probele fără tratament cu cele cu tratament termic, rezistențele la întindere pentru probele R52FTT și R44FTT au fost mult mai mari.

Concluzii

În graficele următoare sunt prezentate rezistențele la întindere prin încovoiere la vârsta de 7 zile pentru diferite adaosuri și procente utilizate în realizarea lianților ecologici activați alcalin cu tratament termic. Cea mai mare rezistență la încovoiere, și anume 4,7 N/mm², a fost obținută pentru liantul ecologic notat cu R50 realizat cu un adaos de SiO_2 (24,3%) și $Ca(OH)_2$ (8,7%). Acest liant a avut o creștere de 2,3 N/mm², comparând cu proba martor notată cu R21 realizată doar pe bază de cenușă zburătoare și o molaritate 6M, care a avut o rezistență la întindere de 2,4 N/mm². Cea mai mică rezistență la încovoiere, pentru lianții ecologici realizați cu diferite adaosuri a fost de 1,8 N/mm² și s-a obținut pentru pasta geopolimeră notată R52 cu adaos de SiO_2 (24,3%) și $Ca(OH)_2$ (12,5%).

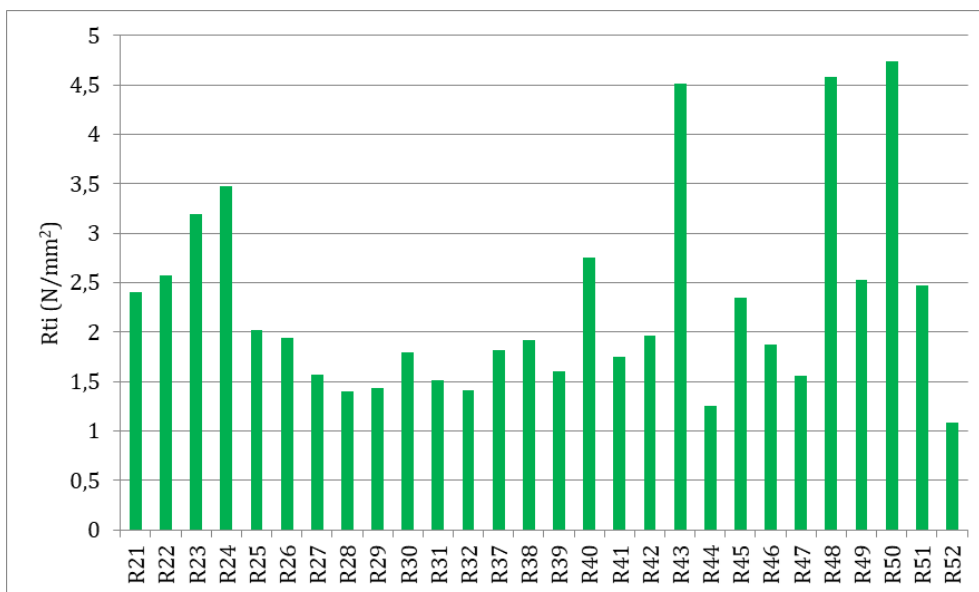


Fig. 5.52. Lianți ecologici realizați cu tratament termic, cu diferite adaosuri, la vârsta de 7 zile

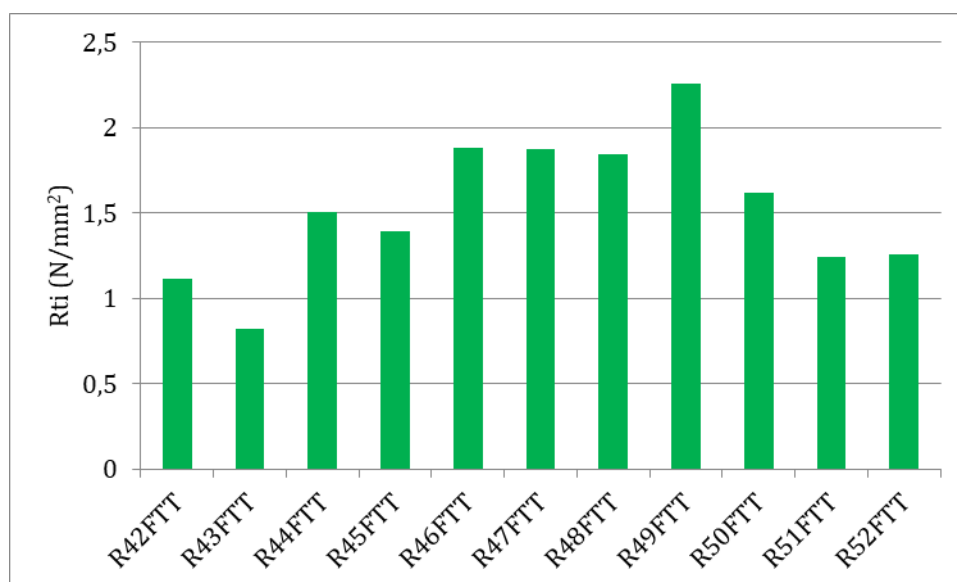


Fig. 5.53. Lianți ecologici realizați fără tratament termic, cu diferite adaosuri

Lianții ecologici realizați fără tratament termic au fost testați la vârsta de 14 zile, deoarece aceștia nu erau întăriți total, iar decofrarea a fost făcută abia după 7 zile. În ceea ce privește pastele geopolimere realizate cu diferite adaosuri, fără tratament termic, rezistența la întindere prin încovoiere, la vârsta de 14 zile, cea mai mare valoare $R_{ti}=2,6 \text{ N/mm}^2$ a fost obținută pentru rețeta R49FTT. Rețeta R49TT a avut un adaos de SiO_2 (24,3%) și Ca(OH)_2 (7,5%). Cea mai mică rezistență la încovoiere, pentru pastele geopolimere realizate cu diferite adaosuri, a fost de $0,8 \text{ N/mm}^2$ și s-a obținut pentru pasta geopolimeră notată R52FTT cu adaos de SiO_2 (24,3%) și Ca(OH)_2 (10,0%).

5.5.3. Rezistența la compresiune

Rezistențele la compresiune s-au făcut pe epruvete pătrate de 40x40mm, obținute în urma încercărilor la întindere prin încovoiere.

S-a determinat rezistența la compresiune a șase cuburi pentru fiecare rețetă și s-a făcut media valorilor obținute.

5.5.3.1. Liant ecologic pe bază de cenușă zburătoare

Rezistențele la compresiune au crescut odată cu creșterea raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ de la 1 la 2,5. Acest lucru se precizează și în literatura de specialitate studiată, și anume că rezistența unei paste sau a unui beton geopolimer crește odată cu creșterea raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$. Cea mai mare rezistență la compresiune obținută pentru paste realizate cu o concentrație NaOH -8M a fost de 32,47 N/mm², pentru rețeta notată cu R4. Rezistența la compresiune a avut o creștere de 8,62 N/mm² față de rețeta R1. Rezistențele la compresiune au crescut progresiv cu aproximativ 3 N/mm² odată cu creșterea raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$.

Cea mai mare rezistență la compresiune, pentru paste geopolimere realizate cu o concentrație NaOH -10M, a fost de 34,54 N/mm² pentru rețeta R8 cu un raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ =2,5. Cea mai mică rezistență a fost de 26,29 N/mm² pentru rețeta R5 cu un raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ =1. Creșterea rezistențelor la compresiune a pastelor geopolimere 10M a fost liniară, având o creștere de aproximativ 3 N/mm² pentru o creștere a raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ =0,5.

5.5.3.2. Liant ecologic realizat prin substituirea cenușii zburătoare în proporții de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură

❖ Cu tratament termic

Rezistențele la compresiune a pastelor cu substituție de praf de marmură au fost comparate cu proba martor, fără substituție, pentru fiecare raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$.

Așa cum se poate observa în Tabel 5.45. și Fig. 5.54. în raport cu compoziția considerată martor, R4, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R9, R10, R11, rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile scade pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită. Astfel, s-au înregistrat scăderi de 11,3% pentru o substituție de 10% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, cu 17,2%, respectiv cu 53,8% pentru cazurile substituirii cu 25%, respectiv 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

Scăderea rezistenței la compresiune apare din cauza scăderii conținutului de oxizi de siliciu și aluminiu, legăturile geopolimere dintre particulele de praf de marmură și activatorii alcalini fiind mai slabe. De asemenea, prin migrarea prafului de marmură la partea inferioară a tiparului metalic, prin tratament termic s-a format o epruvetă bicomponentă realizată din cenușă zburătoare la partea superioară, respectiv praf de marmură la cea inferioară. Epruvetele din liant ecologic au fost neuniforme, neomogene, având la partea inferioară mai mult praf de marmură, iar la partea superioară mai multă cenușă.

În raport cu compoziția considerată martor, R3, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R12, R13, R14, rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile scade pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită. Astfel, s-au înregistrat scăderi de 7,1% pentru o substituție de 10% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, cu 13,2%, respectiv cu 55,5% pentru cazurile substituirii cu 25%, respectiv 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

Comparativ cu proba considerată martor și notată cu R2, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R15, R16, R17, rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile scade pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită. Astfel, s-au înregistrat scăderi de 9% pentru o substituție de 10% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, cu 21,7%, respectiv cu 54,2% pentru cazurile substituiri cu 25%, respectiv 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

Comparând cu compoziția considerată martor R1, prin substituirea unei părți din cenușa zburătoare cu praf de marmură, respectiv compozițiile R18, R19, R20, rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile scade pe măsură ce crește procentul de cenușă substituită. Astfel, s-au înregistrat scăderi de 7,5% pentru o substituție de 10% a cenușii zburătoare cu praf de marmură, cu 14,8%, respectiv cu 36,9% pentru cazurile substituiri cu 25%, respectiv 50% a cenușii zburătoare cu praf de marmură.

❖ **Fără tratament termic**

Rezistențele la compresiune au scăzut odată cu creșterea procentului de marmură.

La vârsta de 28 zile, rezistența la compresiune cea mai mare a fost obținută pentru rețeta nota cu R54FTT cu o substituție de 25% praf de marmură.

Comparativ cu probele realizate cu tratament termic, cele realizate fără tratament termic, rezistențele la compresiune la vârsta de 7 zile sunt mai mici. Astfel au fost scăderi de 18,8%, 32,8% și 28% pentru cazurile de substituție cu praf de marmură în procente de 10%, 25% și 50%.

5.5.3.5. Liant ecologic realizat cu diferite adaosuri și procente la cenușa zburătoare

❖ **Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3**

În urma determinărilor efectuate, se observă că rezistențele la compresiune la vârsta de 7 zile au crescut prin introducerea adaosului de trioxid de fier. Astfel, s-au înregistrat creșteri cu 21,7% pentru un adaos 1% de trioxid de fier la cenușa zburătoare, cu 15,3%, respectiv cu 14,8 % pentru cazurile de adaos trioxid de fier 5%, respectiv 10% la cenușa zburătoare.

Rezultatele obținute în acest studiu sunt în corelație cu cele obținute de Zailani et al. (2020) [84] și Kaya et al. (2022) [222], dar în contradicție cu cele a lui Xiong (2012) [223].

❖ **Adaos de trioxid de fier Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO și $Ca(OH)_2$**

Se poate observa din Tabel 5.53. că pentru probele R45 la vârsta de 7 zile s-a atins 93,3% din rezistența la compresiune la 28 zile. Acest fapt arată că tratamentul termic este benefic reacției de geopolimerizare, rezultate obținute și în literatura de specialitate. Pe de altă parte, se poate observa că, pe măsură ce adaosul de $Ca(OH)_2$ crește, pentru obținerea unei lucrabilități satisfăcătoare a compozițiilor a fost necesară creșterea cantității de lichid alcalin, fapt care a dus la obținerea de rezistențe mecanice inferioare. Mai mult, se poate observa că rezistențele mecanice ale pastei geopolimere au scăzut odată cu creșterea vârstei de testare. De asemenea, și Temuujin et al. (2009) [65] au obținut rezistențe mai mici prin substituția cenușii zburătoare cu compuși de calciu (CaO și $Ca(OH)_2$) pentru geopolimerii realizați cu un tratament termic de 70°C, dar au crescut rezistențele pentru cele realizate fără tratament termic (20°C).

Rezistențele la compresiune în cazul pastelor geopolimere fără tratament termic au crescut la vârsta de 14 zile, comparativ cu cele la 7 zile.

În comparație cu probele realizate cu tratament termic, deși pastele geopolimere realizate fără tratament termic au fost fisurate datorită contracției, au avut rezistențe la compresiune mai mari la vârsta de 14 zile, pentru probele cu adaos de 10% și 20% $Ca(OH)_2$.

Rezistența cea mai mare a pastelor geopolimere la vârsta de 7 zile a fost obținută pentru rețeta notată cu R47FTT. Se poate spune că pastele geopolimere cu un adaos de 20% Ca(OH)_2 , realizate fără tratament termic au rezistențe mai mari comparative cu cele cu tratament termic.

În primele 28 de zile, s-a observat că pasta geopolimeră cu un adaos de 1% Fe_2O_3 are rezistența la compresiune cea mai bună în raport cu celelalte lianți ecologici. După 28 zile, rezistența probei considerate martor s-a dublat la vârsta de 95 zile și a fost mai mare decât a pastelor geopolimere cu adaos de trioxid de fier în proporție de 1% și 10%. S-a observat că adăugarea de MgO la pasta geopolimeră nu a redus contracția și au fisurat în cazul celor fără tratament termic. Rezultatele obținute nu sunt în concordanță cu cele obținute de Zhaocheng et al. (2019) [83], care au dispersat uniform în geopolimer pulberi de MgO pentru a compensa contracția uniformă a pastelor geopolimere. Rezultatele obținute de aceștia indică faptul că, contracția scade odată cu adăugarea de MgO . Este posibil ca adaosul de MgO să fie redus de cantitatea de Ca(OH)_2 .

❖ **Adaos de SiO_2 și Ca(OH)_2**

Comparativ cu proba considerată martor R22, rezistențele la compresiune a pastelor realizate cu tratament termic la vârsta de 7 zile au scăzut. Cea mai mare rezistență de 20,53 N/mm^2 s-a obținut pentru pasta geopolimeră notată cu R50, iar cea mai mică pentru pasta R52, și anume 1,55 N/mm^2 .

Probele realizate fără tratament termic au fost testate la vârstele de 14 și 28 zile, deoarece la vârsta de 7 zile nu erau întărite complet. Rezistența la compresiune cea mai mare a probelor realizate fără tratament termic la vârsta de 14 zile s-a obținut pentru pasta geopolimeră notată cu R44FTT.

Analizând rezultatele obținute (TT vs FTT) la vârsta de 14 zile, rezistențele la compresiune au fost mai mari doar pentru probele R48, R49, R50 și R51. La vârsta de 28 zile doar rezistența la compresiune a liantului notat cu R51 a fost mai mare față de cel realizat fără tratament termic, celelalte fiind mai mici.

Concluzii lianți ecologici cu adaosuri

Rezistențele la compresiune, ale pastelor geopolimere activate alcalin, realizate cu tratament termic (24H, 70°C), cu diferite adaosuri s-au determinat la diferite vârste și anume 7, 14 și 28 zile. Cea mai mare rezistență la compresiune la vârsta de 7 zile s-a obținut pentru liantul notat cu R22 (22,1 N/mm^2), care a fost realizat cu un adaos de 1% Fe_2O_3 și a fost mai mare decât proba martor notată cu R21 (18,2 N/mm^2).

Se observă că rezistențele la compresiune la vârsta de 7 zile au crescut prin introducerea adaosului de trioxid de fier. Astfel, s-au înregistrat creșteri cu 21,7% pentru un adaos 1% de trioxid de fier la cenușa zburătoare (R22), cu 15,3%, respectiv cu 14,8 % pentru cazurile de adaos trioxid de fier 5% (R23), respectiv 10% (R24) la cenușa zburătoare. De asemenea, odată cu introducerea adaosului de zgură de aluminiu, rezistențele la compresiune scad. Astfel, s-au înregistrat scăderi cu 7% pentru un adaos 1% de zgură de aluminiu la cenușa zburătoare și trioxidul de fier (R25), cu 58,5%, respectiv cu 79,5 % pentru cazurile de adaos zgură de aluminiu 5% (R26), respectiv 10% (R27) la cenușa zburătoare și trioxidul de fier.

Rezistențele la compresiune ale pastelor geopolimere cu adaos de SiO_2 și Ca(OH)_2 au demonstrat că cele realizate fără tratament termic, la o temperatură ambientală au o rezistență la compresiune mai bună decât cele realizate cu un tratament termic de 70°C. Rezistența la compresiune a pastei geopolimere notată cu R44, la vârsta de 14 zile a fost de 6,61 N/mm^2 în cazul tratamentului termic, iar pentru cea fără tratament termic a fost de 15,99 N/mm^2 , pentru ca la vârsta de 28 zile aceasta să crească de la 9,11 N/mm^2 la 20,3

N/mm². Rezultatele obținute în urma cercetării sunt în corelație cu rezultatele altor cercetători, conform literaturii de specialitate.

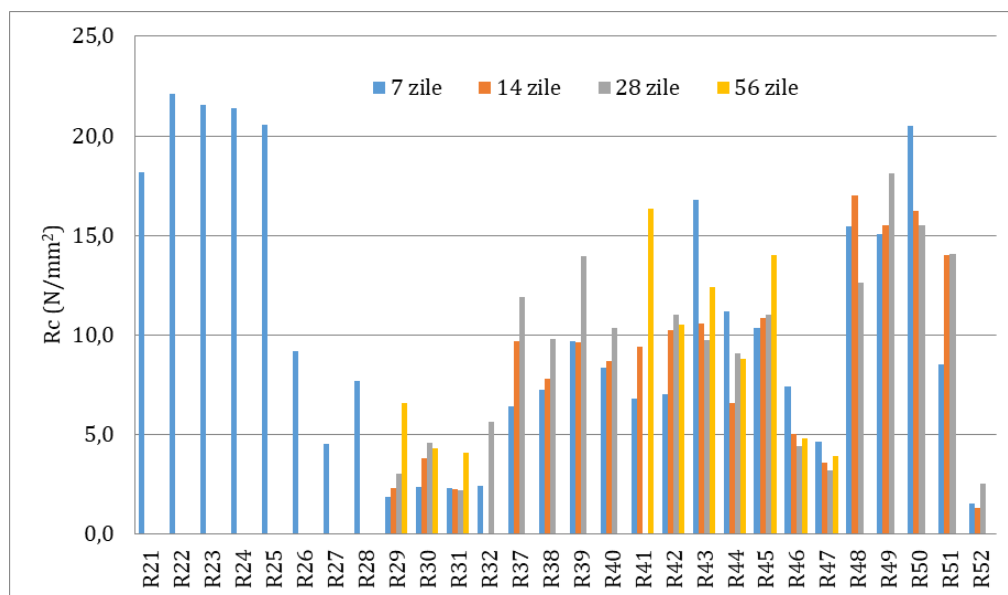


Fig. 5.61. Rezistențe la compresiune ale lianturilor ecologice cu diferite adaosuri realizate cu tratament termic

Analizând comparativ cu alte raportări de specialitate rezultatele obținute, se poate spune că, compoziția oxidică și caracterizările structurale, cristalografice, mineralogice ale materiilor prime utilizate, influențează performanțele materialului geopolimer obținut. Prin urmare, această cercetare contribuie prin gradul său de noutate la nivelul de cunoaștere actual.

5.5.6. Analiza microscopică a pastelor geopolimere cu substituție a cenușii zburătoare realizate cu/fără tratament termic.

Comparând liantul geopolimer notat cu R4, realizat cu o soluție NaOH-8M, cu liantul notat cu R8, realizat cu o soluție de NaOH-10M, se observă că liantul R8 este mai poros. Fig. 5.67. demonstrează că, odată cu substituția cenușii în proporție de 10% cu praf de marmură MD (R9) și zgură de furnal BFS (R34) în lianturile geopolimere realizate cu tratament termic (70°C, 24h), dimensiunile și/sau numărul porilor scad. De asemenea, există diferențe între lianturile (R9 și R34) realizate cu tratament termic față de cele realizate fără tratament termic (R53FTT, R34FTT). În cazul celor realizate fără tratament termic (23°C), structura acestora este mult mai compactă, iar porii sunt foarte mici și puțini.

Concluzii:

În urma analizării imaginilor microscopice realizate la o rezoluție de 1X-2mm s-a constatat că lianturile conțin mai puțini pori odată cu substituția cenușii zburătoare în proporție de 10% cu praf de marmură și zgură de furnal. Pastele geopolimere realizate fără tratament termic (23°C), comparativ cu cele realizate cu tratament termic (70°C) sunt mult mai compacte. Deși pastele geopolimere sunt mult mai compacte, rezistențele mecanice ale acestora scad odată cu substituția cenușii zburătoare și sunt mai mici, comparativ cu cele realizate cu tratament termic. Astfel, se poate spune că dimensiunile și numărul porilor nu influențează rezistențele acestora.

Lipsa tratamentului termic duce la nereacționarea materiilor prime cu activatorul alcalin, geopolimerizarea este incompletă, ducând la scăderea rezistențelor mecanice.

5.5.7. Influența raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ asupra rezistențelor mecanice ale lianturilor ecologice pe bază de cenușă zburătoare, cu molarități diferite ale soluției de NaOH

Rezistențele la compresiune pe cuburi cu dimensiunile de 40x40x40mm, au crescut odată cu creșterea raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de la 1 la 2,5 în ambele cazuri de molarități utilizate, și anume 8M și 10M. Așa cum se poate observa, rezistențele la compresiune au crescut odată cu creșterea raportului între silicatul de sodiu și hidroxidul de sodiu pentru cele două molarități studiate, și anume 8M și 10M. Rezistențele la compresiune au avut creșteri procentuale de 10%, 11% și 6% pentru raporturi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ de 1,0; 2,0; 1,5 și 2,5 odată cu creșterea molarității de la 8 la 10M.

În ceea ce privește realizarea materialelor geopolimere, fie că vorbim de o pastă, un microbeton sau un beton, conform studiilor de specialitate, nu se poate argumenta clar care este raportul și aportul exact al fiecărei componente pentru a obține rezultate optime.

Potrivit literaturii de specialitate studiate, rezistențele la compresiune pe paste și betoanele geopolimere cresc odată cu creșterea raportului între $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$.

Pe baza rezultatelor obținute, se poate afirma faptul că, creșterea rezistențelor la compresiune a pastelor geopolimer realizate pe bază de cenușă zburătoare și activatori alcalini (Na_2SiO_3 și NaOH), cu tratament termic (70°C, 24h), este influențată de creșterea raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ și a creșterii molarității soluției de NaOH.

5.5.8. Influența raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ asupra rezistențelor la compresiune și încovoiere a probelor realizate cu substituție de praf de marmură (10%, 25% și 50%) în comparație cu probele martor

Analizând graficele prezentate în Figura 5.72., se observă că rezistențele la compresiune pentru proba martor și pentru probe obținute prin substituție cu marmură 10% și 25% au valori apropiate indiferent de raportul $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ cu ușoare scăderi pentru o valoare a raportului egal cu 1,5.

Scăderi semnificative ale rezistenței la compresiune față de proba martor apar la toate probele obținute prin substituție cu 50% marmură de la 36,8% pentru o valoare a raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=1$ la 53,7% pentru o valoare a raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2,5$.

Graficele prezentate în Figura 5.71. arată că rezistențele la încovoiere pentru proba martor și pentru probe obținute prin substituție cu marmură 10% și 25% au valori apropiate, indiferent de raportul $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ exceptând probele obținute pentru o valoare a raportului egal cu 1. De asemenea, se observă o scădere a rezistențelor la încovoiere pentru o valoare a raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ egală cu 1,5.

Scăderi semnificative ale rezistenței la încovoiere față de proba martor se constată pentru toate probele obținute prin substituție cu 50% marmură de la 41,9 % pentru o valoare a raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=1$ la 21,4 % pentru o valoare a raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2,5$.

Chiar dacă raportul $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ este același pentru toate probele, există diferențe în rezistențele la compresiune. Diferența mare între valoarea rezistenței la compresiune pentru proba martor și pentru proba cu substituție 50% marmură se poate explica prin creșterea conținutului de carbon de la 2,7 în proba cu 25% substituție cu marmură la 5,5% în proba cu 50% substituție cu marmură.

5.5.9. Influența tratamentului termic asupra proprietăților mecanice ale liantului ecologic activat alcalin cu substituție de praf de marmură

Pentru a analiza influența tratamentului termic asupra proprietăților mecanice ale pastei geopolimere activate alcalin s-au comparat pastele geopolimer R9 realizată cu tratament termic (70°C, 24h) și pasta R53FTT realizată fără tratament termic (23±2°C). Pastele studiate au fost realizate cu cenușă zburătoare 90% și 10% praf de marmură, având o concentrație molară de 8M și un raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2.5$.

Se observă că pasta geopolimeră notată cu R9, realizată cu tratament termic (70°C, 24h) are o rezistență la încovoiere mai mare decât R53FTT, realizată fără tratament termic (23±2°C).

Rezultatele rezistențelor la compresiune au arătat că întărirea termică afectează în mare măsură rezistența timpurie a geopolimerului pe bază de cenușă zburătoare, deoarece rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile a probelor realizate cu tratament termic a fost cu aproximativ 2,5 % mai mare decât cea a probelor întărite la o temperatură ambiantă, fără tratament termic.

După efectuarea testelor de tracțiune prin încovoiere, s-au efectuat teste de rezistență la compresiune pe jumătățile epruvetelor de pastă geopolimeră, pe cuburi de 40 x 40 mm. Rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile fost de 28,80 N/mm² pentru rețeta R9 (cu tratament termic) și 23,40 N/mm² pentru rețeta R53FTT (Fig. 5.74.). Este posibil ca, datorită temperaturii mai ridicate (70°C) și a duratei tratamentului termic (24h), legăturile compușilor formați în pasta geopolimeră să fie mai puternici decât în pasta geopolimeră fără tratament termic (23±2°C). O influență asupra rezistenței la compresiune o are în primul rând formarea gelului geopolimer care se dezvoltă mai rapid în prezența temperaturii ridicate (între 40-90°C).

Rezultatele obținute sunt în concordanță cu literatura de specialitate în care se spune că rezistențele mecanice sunt mai mari în cazul probelor realizate cu tratament termic în comparație cu cele realizate fără tratament termic.

5.5.10. Influența substituției cenușii zburătoare cu zgură de aluminiu

Pentru realizarea pastelor geopolimere activate alcalin pe bază de cenușă zburătoare (75%) și zgură de aluminiu (25 %) s-a folosit un raport $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2,5$, iar concentrația molară de NaOH a fost de 8M. Zgura de aluminiu utilizată în cercetare a provenit de la o firmă de prelucrare deșeuri.

Comparativ, între probele cu tratament termic și fără tratament termic, la vârsta de 7 zile densitatea aparentă a fost mai mare pentru probele realizate fără tratament termic.

Atât rezistențele la încovoiere, cât și la compresiune au fost mai mari pentru pastele geopolimere fără tratament termic.

5.6. Concluzii

Cenușă zburătoare

Densitatea aparentă la vârsta de 7 zile a pastelor geopolimere activate alcalin cu diferite molarități NaOH-8 și 10M a fost cuprinsă între 1340-1380 kg/m³.

Rezistența la întindere prin încovoiere la vârsta de 7 zile s-a efectuat pe epruvete cu dimensiunile de 40x40x160mm. Rezistențele la încovoiere pe epruvetele din paste geopolimere cu NaOH-8M au fost cuprinse între 2,49-3,45 N/mm². Aceste rezistențe sunt ușor

mai scăzute decât cele al pastelor geopolimere realizate cu o soluție NaOH-10M, fiind între 2,57-3,65 N/mm².

Rezistența la compresiune pe cuburi de 40x40 mm a crescut liniar odată cu creșterea raportului Na₂SiO₃ /NaOH de la 1 la 2,5 pentru cele două tipuri de soluție de NaOH cu molarități diferite 8 și 10. Rezistențele la compresiune la vârsta de 7 zile sunt influențate de raportul Na₂SiO₃/NaOH și de molaritatea soluției de NaOH. Dacă pentru pastele geopolimere pe bază de cenușă zburătoare activate alcalin cu ajutorul unei soluții de Na₂SiO₃ și NaOH-8M rezistențele au fost cuprinse între 23,85N/mm² și 32,47 N/mm², pentru cele cu o soluție NaOH-10M, rezistențele la compresiune au crescut, fiind între 26,3N/mm² și 34,5 N/mm².

Substituție cu praf de marmură

Pe măsură ce cenușa zburătoare (F.A.) a fost substituită în proporție de 10%, 25% și 50% cu praf de marmură (M.D.), sau zgură de furnal (B.F.S.) comparativ cu proba martor s-a observat că:

- lucrabilitatea pastelor în stare proaspătă, la turnare a scăzut odată cu introducerea procentuală a prafului de marmură
- densitatea la turnare crește cu 5,1% până la 12,2%.
- densitatea pastei geopolimere imediat după parcurgerea celor 24 ore de tratament termic, crește cu 6,8% până la 20,8%
- densitatea pastei geopolimere maturată la 7 zile de la turnare crește cu 7,4% până la 23,1%
- rezistențele mecanice ale pastei geopolimere la vârsta de 7 zile de la turnare sunt reduse cu până la 41,9% în cazul rezistenței la întindere prin încovoiere și cu minim 7.1% și maxim 55.5% în cazul rezistenței la compresiune.

Cele mai bune proprietăți fizico-mecanice pentru lianturile realizate cu diferite adaosuri s-au obținut pentru adaosul de trioxid de fier, ducând la creșteri cu 21,7 % pentru un adaos de 1% Fe₂O₃ la cenușa zburătoare (R21), 15,3 % respectiv 14,8% pentru cazurile de adaos de trioxid de fier de 5% (R23), respectiv 10% (R24).

Prin adaosul de SiO₂ și Ca(OH)₂ la cenușa zburătoare, s-au obținut rezistențe mai bune pentru lianturile ecologice realizate fără tratament termic în comparație cu cele realizate la o temperatură de 70oC, 24h.

6. Beton ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin

6.2. Obiective

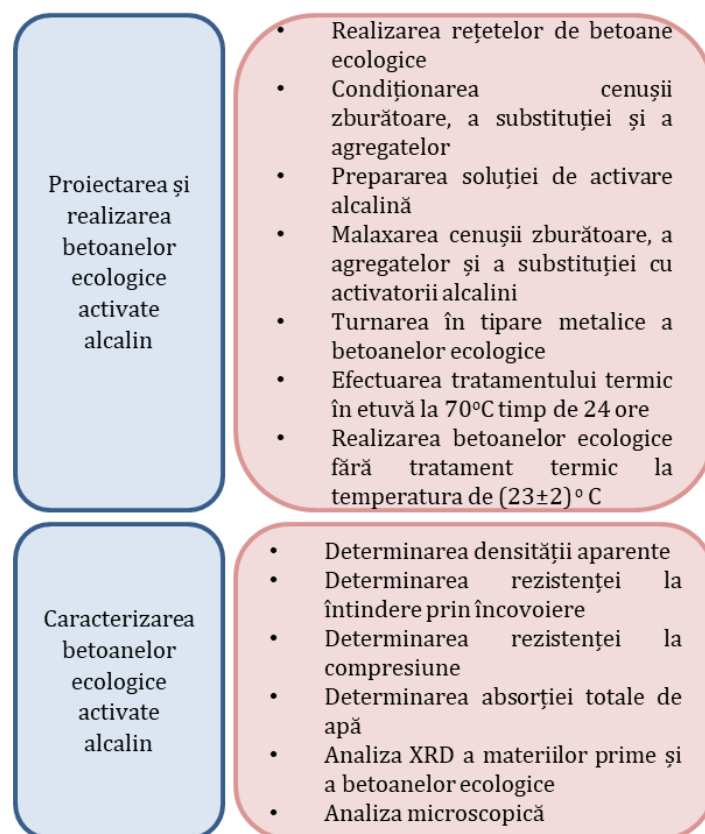


Fig. 6.1. Metodologia de cercetare a betonului ecologic activat alcalin și etapele parcurse

6.3. Materiale și metode

Plecând de la rețetele pastelor ecologice activate alcalin, s-a trecut la realizarea unor betoane ecologice pe bază de cenușă zburătoare și praf de marmură ca substituție.

Betoanele prezentate în acest studiu s-au realizat prin două metode: cu tratament termic (70°C și o durată de 24h) și fără tratament termic, la o temperatură ambientală ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$).

Pentru proiectarea și realizarea betonului ecologic, s-au utilizat următoarele materiale componente:

- Cenușă zburătoare (F.A.)
- Praf de marmură (M.D.) ca substituție 10% și 25%
- Agregate de râu sort 0-4 și 4-8 mm
- Soluție de hidroxid de sodiu NaOH (8M)
- Soluție de silicat de sodiu (Na_2SiO_3)

Ca activator alcalin în realizarea acestor betoane ecologice s-a utilizat o soluție pe bază de NaOH cu o concentrație molară de 8 și silicat de sodiu. Raportul între $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ a fost de 2,5.

Tabel 6.1. Rețetele betoanelor ecologice cu și fără tratament termic

Rețeta	F.A.		M.D.		F.A. + M.D.	Soluție Na ₂ SiO ₃	Soluție NaOH (8M)	Total soluție	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Soluție / (F.A. +M.D.)	Total agregate
	Nr.	%	g	%	g	g	g	g	-	g	0÷8 g
Tratament termic (70°C, 24h)											
M2	100	600	0	0	600	428.6	171.4	600	2.5	1.00	1114
M3	90	540	10	60	600	428.6	171.4	600	2.5	1.00	1114
M4	75	450	25	150	600	428.6	171.4	600	2.5	1.00	1114
Fără tratament termic (23°C)											
M5	100	600	0	0	600	428.6	171.4	600	2.5	1.00	1114
M6	90	540	10	60	600	428.6	171.4	600	2.5	1.00	1114
M7	75	450	25	150	600	428.6	171.4	600	2.5	1.00	1114

6.4. Rezultate

6.4.1. Determinarea densității aparente

Odată cu creșterea substituției cenușii zburătoare cu praf de marmură în procente de 10 și 25% cresc și densitățile aparente. În raport cu proba martor M2, densitățile aparente au crescut cu 2,7% și 4,3 % în stare proaspătă, cu 3,5% și 7,6% la vârsta de 7 zile, respectiv cu 3,6% și 9% la vârsta de 28 zile.

Față de proba martor M2, densitatea aparentă a probei M4 (realizată cu substituție 25% praf de marmură) a avut o creștere mult mai mare decât proba M3 (realizată cu substituție 10% praf de marmură). Astfel, creșterea procentuală a fost cuprinsă între 2,7÷3,6% pentru proba M3, iar pentru proba M4 a fost cuprinsă între 4,3÷9%.

Și în cazul betoanelor ecologice realizate fără tratament termic, densitatea aparentă a crescut odată cu substituția cenușii zburătoare cu praful de marmură. În raport cu proba martor M5 s-au înregistrat creșteri de 3,8% și 5,4% la vârsta de 14 zile și 4,4% și 6,1%.

Față de proba martor M4 (realizată cu tratament termic cu substituție 25% praf de marmură), proba M7 (realizată fără tratament termic, prin substituția cenușii zburătoare cu 25% praf de marmură), a avut o creștere procentuală mai mică a densității. Prin tratament termic este eliminat surplusul de lichid din matricea betonului.

6.4.2. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere

6.4.2.1. Compozițiile M2, M3 și M4 (70°C, 24h)

Se observă că odată cu creșterea substituției cenușii zburătoare cu praf de marmură în procente de 10 și 25% scad rezistențele la încovoiere. În raport cu proba martor M2, rezistențele au scăzut cu 20% și 32,7 % la vârsta de 7 zile respectiv cu 19,7% și 30,2% la vârsta de 28 zile.

Față de proba considerată martor M2, rezistența la întindere prin încovoiere a probei M4 (realizată cu substituție 25% praf de marmură) a avut o scădere mult mai mare decât proba M3 (realizată cu substituție 10% praf de marmură). Astfel, scăderea procentuală a fost cuprinsă între 19,7÷25,8% pentru proba M3 iar pentru proba M4 a fost cuprinsă între 30,2÷32,7%.

6.4.2.2. Compozițiile M5, M6 și M7 (23°C)

Și în cazul betoanelor ecologice realizate fără tratament termic, rezistența la întindere prin încovoiere a scăzut odată cu substituția cenușii zburătoare cu praful de marmură. În raport cu proba martor M5 s-au înregistrat scăderi de 15,8% și 12,8% la vârsta de 14 zile. La vârsta de 28 zile, rezistențele au crescut în raport cu proba martor. Creșterile au fost de 6,7% pentru proba M6 și 21% pentru proba M7.

În cazul probei M7 (realizată prin substituția cenușii zburătoare cu 25% praf de marmură, fără tratament termic) în raport cu proba martor, a avut o scădere procentuală mai mică a rezistenței la încovoiere la vârsta de 7 și 14 zile comparativ cu proba M4 (realizată prin substituția cenușii zburătoare cu 25% praf de marmură, cu tratament termic).

6.4.3. Determinarea rezistenței la compresiune

6.4.3.1. Compozițiile M2, M3 și M4 (70°C, 24h)

Ca și în cazul rezistenței la încovoiere, se observă că odată cu creșterea substituției cenușii zburătoare cu praf de marmură în procente de 10 și 25% scad rezistențele la compresiune. În raport cu proba martor M2, rezistențele au scăzut cu 1,8% și 24,6 % la vârsta de 7 zile respectiv cu 4,2% și 23,0% la vârsta de 28 zile.

Față de martor M2, rezistența la compresiune a probei M4 (realizată cu substituție 25% praf de marmură) a avut o scădere mult mai mare decât proba M3 (realizată cu substituție 10% praf de marmură). Astfel, scăderea procentuală a fost cuprinsă între $1,8 \div 4,2\%$ pentru proba M3, iar pentru proba M4, între $23,0 \div 24,6\%$.

6.4.3.2. Compozițiile M5, M6 și M7 (23°C)

În urma determinării rezistenței la compresiune a cuburilor de beton ecologic realizate fără tratament termic, s-a observat că rezistențele au scăzut odată cu substituția cenușii zburătoare cu praful de marmură. În raport cu proba martor M5 s-au înregistrat scăderi de 18,4% și 20,7% la vârsta de 14 zile. La vârsta de 28 zile, rezistența a fost aproape similară cu proba martor în cazul substituirii cenușii zburătoare cu 25%.

Așa cum se poate observa în Fig. 6.12., rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile a betoanelor ecologice realizate fără tratament termic, este foarte mică ($4,48 \div 3,18$ N/mm²). Această rezistență mică se poate datora și faptului că probele au stat în tipare metalice și au fost umede la testare. Cu toate acestea, pe măsură ce materialul se maturează, se înregistrează o creștere substanțială a rezistențelor la 28 zile, în raport cu cele la 7 zile. Creșterile rezistențelor la 28 zile comparativ cu cele la 7 zile au fost de 294%%, 302% și 452% pentru betoanele ecologice notate cu M5, M6 și respective M7.

Acest comportament poate să semnifice, pe de o parte, nevoia de tratament termic, iar, pe de altă parte, posibilitatea de a atinge rezistența mecanică dorită, dar într-o perioadă mai lungă de timp. Cu alte cuvinte, tratamentul termic este un factor accelerator al proceselor de geopolimerizare care au loc în matricea geocompozitului.

7. Concluzii finale

7.1. Concluzii generale

Concluziile generale ale acestei teze de doctorat sunt evidențiate în cele ce urmează.

În **Capitolul 1** este prezentată justificarea abordării temei de doctorat “Beton ecologic pe bază de lianți minerali, activați alcalin”. Pentru a proteja mediul înconjurător, industria construcțiilor trebuie să se alinieze la standardele de dezvoltare sustenabilă și economie circulară prin realizarea de materiale durabile, utilizând ca materie primă deșeuri industriale. O alternativă la betonul tradițional cu ciment Portland poate fi betonul ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin. Beton ecologic poate fi considerat un “beton verde”, care nu folosește ciment Portland. O proprietate a betoanelor geopolimere o reprezintă întărirea rapidă a acestora, ajungând la 90% din rezistența la compresiune după șapte zile, comparativ cu un beton tradițional cu ciment Portland care ajunge la maturitate din punct de vedere al rezistenței doar la vârsta de 28 de zile. Acest beton este realizat utilizând ca materii prime deșeuri industriale bogate în siliciu și aluminiu, care, activate alcalin cu ajutorul unei amestec de soluții de hidroxid de sodiu și silicat de sodiu, produc o reacție de geopolimerizare, ducând la întărirea materialului. Prin adaosul de agregate sort 0-8 mm se realizează betonul geopolimer. Lianturile și betoanele ecologice au fost realizate prin două metode, și anume: cu un tratament termic (70°C, 24H) sau fără tratament termic (temperatură ambientală 23°C).

Costul de realizare al betoanelor geopolimere variază în funcție de materiile prime care sunt utilizate și de concentrația soluției alcaline folosite. Astfel, scopul este de a realiza betoane geopolimere cu proprietăți mecanice foarte bune, mai convenabile, prin descoperirea unei materii prime ieftine, bogate în Si și Al, utilizând o concentrație cât mai mică a activatorului alcalin.

Capitolul 2 prezintă aspecte legate de istoricul materialelor geopolimere, perspectivele globale în contextul implementării conceptului de “economie circulară”, structura materialelor geopolimere, tipurile și mecanismele reacțiilor de geopolimerizare, materii prime și tipurile de activatori alcalini utilizați în realizarea materialelor geopolimere, influența tratamentului termic asupra reacției de geopolimerizare, precum factorii care influențează proprietățile materialelor geopolimere și rezistențele la compresiune ale geopolimerilor realizați cu tratament termic sau fără, la o temperatură ambientală, toate acestea raportate la diverși autori din literatura de specialitate.

Ipotezele de lucru ale acestei teze de doctorat sunt prezentate în **Capitolul 3**.

Metodologia generală de realizare a liantului și a betonului ecologic precum și aparatura utilizată în realizarea și testarea acestui material geopolimer sunt descrise în **Capitolul 4**.

Capitolul 5 aprofundează liantul ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin, modul de realizare a acestui liant, caracteristicile materiilor prime, adaosurile și substituțiile cenușii zburătoare utilizate. Ca substituenți ai cenușii zburătoare au fost utilizați praful de marmură, zgura de furnal și de aluminiu în diferite proporții (10%, 25% și 50%). Ca adaosuri în amestecul de materii prime, au fost folosiți trioxidul de fier, oxidul de magneziu, dioxidul de siliciu, hidroxidul de calciu sau perlitul. Liantul ecologic a fost realizat prin două metode: cu tratament termic (70°C, 24H) sau fără (temperatură ambientală 23°C). Concentrația molară a soluției de NaOH utilizată a fost 6M, 8M și 10M. Raportul dintre $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ studiat a fost

de 1; 1,5; 2 și 2,5. Influența substituțiilor și adaosurilor în ceea ce privește proprietățile fizico-mecanice, microstructura lianturilor și absorbția de apă sunt prezentate tot în acest capitol.

Tabel 7.1 Liant ecologic pe bază de cenușă zburătoare – proprietăți fizico-mecanice

Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Densitate aparentă									Rezistența la întindere prin încovoiere R _{ti} (N/mm ²)			Rezistența la compresiune R _c (N/mm ²)		
	Turnare			Tratament termic (70°C, 24H)			7 zile								
	Soluție NaOH			Soluție NaOH			Soluție NaOH			Soluție NaOH			Soluție NaOH		
	6M	8M	10M	6M	8M	10M	6M	8M	10M	6M	8M	10M	6M	8M	10M
1,0		1560	1570		1450	1460		1340	1350		3,3	2,9		23,8	26,3
1,5		1580	1590		1460	1465		1380	1370		2,5	2,6		26,8	29,8
2,0	1580	1590	1595	1380	1440	1460	1290	1370	1380	2,1	3,0	3,6	18	29,5	32,5
2,5		1580	1600		1470	1470		1360	1380		3,4	3,0		32,5	34,5

Tabel 7.2. Rezistențele la compresiune ale pastelor geopolimere pe bază de cenușă zburătoare

Molaritate / Soluții alcaline		Rc (N/mm ²)	Zile	Materie primă (%)	Tratament termic		Ref. -	Rezultate obținute experi- mental
					°C	ore		
CENUȘĂ ZBURĂTOARE (FA)								
NaOH (10)	Na ₂ SiO ₃	42,0	28	FA (100)	65	48	[203]	-
NaOH (10)	Na ₂ SiO ₃	34,5	7	FA (100)	70	24	-	X
NaOH (10)	Na ₂ SiO ₃	34,0	7	FA (100)	65	6	[135]	-
NaOH (10)	Na ₂ SiO ₃	25,4	7	FA (100)	70	24	[61]	
NaOH (10)	Na ₂ SiO ₃	21,6	7	FA (100)	70	24	[61]	
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	32,5	7	FA (100)	70	24	-	X
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	25,3	7	FA (100)	70	24	[61]	
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	20,1	7	FA (100)	70	24	[61]	
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	25,0	7	FA (100)	70	24	[198]	-
NaOH (6)	Na ₂ SiO ₃	18,0	7	FA (100)	70	24	-	X

Tabel 7.3 Liant ecologic cu substituție de praf de marmură – proprietăți fizico-mecanice

Materii prime Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2,5	Densitatea aparentă (kg/m ³)		Rezistența la întindere prin încovoiere R _{ti} (N/mm ²)		Rezistența la compresiune R _c (N/mm ²)					
	70°C, 24H	23°C	70°C, 24H	23°C	70°C, 24H		23°C			
Zile	7/14/28	7/14/28	7/14/28	7/14/28	7	14	28	7	14	28
100%FA	1360/-/-	-/-/-	3,4/-/-	-/-/-	32,5/-/-			-/-/-		
90%FA+10%MD	1550/-/-	1620/1560/1550	3,3/-/-	2,5/2,3/3,5	28,8/-/-			23,4/26,6/20,3		
75%FA+25%MD	1580/-/-	1700/1650/1580	3,4/-/-	3,0/3,0/4,0	26,9/-/-			18,1/26,3/26,1		
50%FA+50%MD	1670/-/-	1740/1720/1650	2,7/-/-	3,7/1,5/4,1	15,0/-/-			10,8/12,5/15,6		

Tabel 7.4. Rezistențele la compresiune ale pastelor geopolimere pe bază de cenușă zburătoare și praf de marmură

Rețetă	Materii prime (%)		Raport activator alcalin / precursor	NaOH	Raport Na ₂ SiO ₃ / NaOH	Densitatea aparentă (kg/m ³)	Rc _{7zile} (N/mm ²)	Ref.	Rezultate obținute experiment - tal
	F.A. Clasa F	M.D.							
Tratament termic 70°C, 24H									
2M-10	90	10	0,22	2M	1	1450	1,82	[57]	
4M-10	90	10	0,22	4M	1	1550	3,34	[57]	
R18	90	10	0,78	8M	1	1550	22,05		X
2M-50	50	50	0,27	2M	1	1550	3,38	[57]	
4M-50	50	50	0,27	4M	1	1680	5,92	[57]	
R20	50	50	0,78	8M	1	1670	15,06		X
Temperatură ambientală (23°C)									
R53FTT	90	10	0,78	8M	1	1620	20,26		X
R55FTT	50	50	0,78	8M	1	1750	15,58		X

Tabel 7.5. Liant ecologic cu substituție zgură de furnal– proprietăți fizico-mecanice

Materii prime $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2,5$	Densitatea aparentă (kg/m^3)		Rezistența la întindere prin încovoiere R_{ti} (N/mm^2)		Rezistența la compresiune R_c (N/mm^2)					
	70°C, 24H	23°C	70°C, 24H	23°C	70°C, 24H			23°C		
Zile	7	7/14/28	7/14/28	7/14/28	7	14	28	7	14	28
100%FA	1360/-/-	-/-/-	3,4/-/-	-/-/-	32,5/-/-			-/-/-		
90%FA+10%BFS	1460	1615/1610/1610	3,3/-/-	3,7/-/-	25,6/25,5/-			8,2/18,6/20,6		
75%FA+25%BFS	1520	1640/1630/1620	2,3/-/-	1,7/-/-	21,0/22,1/-			8,2/17,1/22,0		
50%FA+50%BFS	1630	1700/1680/1630	1,7/-/-	1,4/-/-	11,6/16,8/-			5,8/11,9/8,1		

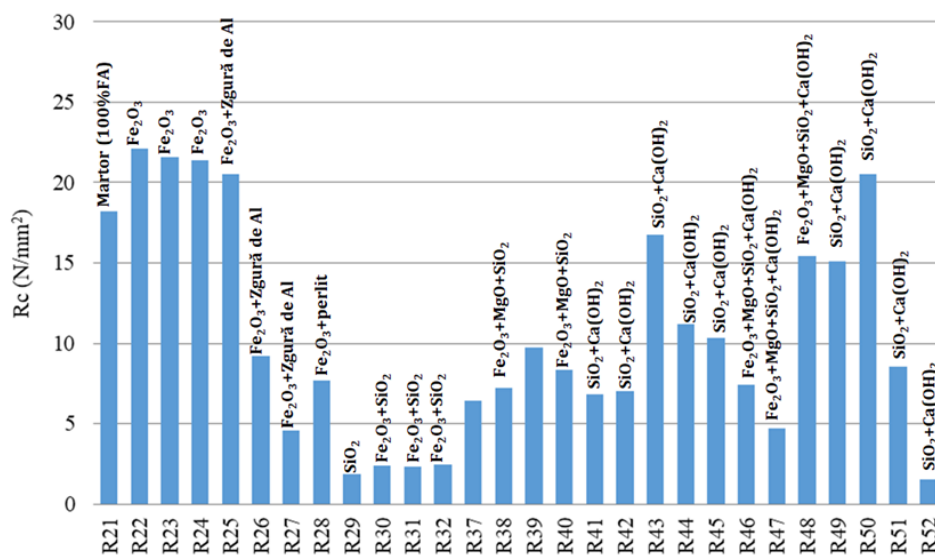


Fig. 7.1 Lianți ecologici cu diferite adaosuri realizați cu tratament termic (70°C, 24H)
Rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile

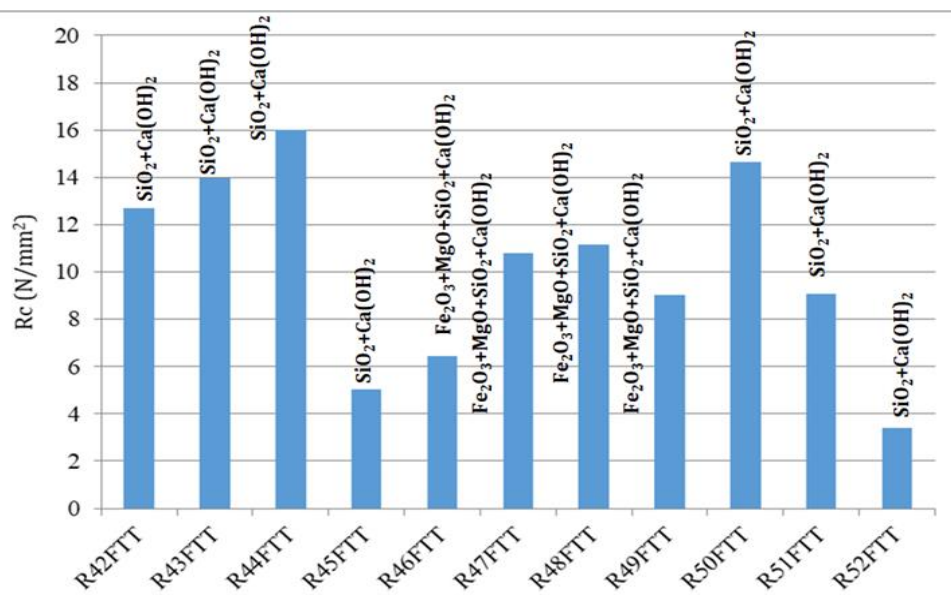


Fig. 7.2 Lianți ecologici cu diferite adaosuri realizați fără tratament termic (23°C)
Rezistența la compresiune la vârsta de 7 zile

Capitolul 6 se concentrează asupra betonului ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalin. Ca și materii prime în realizarea acestor betoane s-au utilizat cenușă zburătoare și praf de marmură și agregat de râu (sort 0-8 mm). Activator alcalin realizat a fost un amestec de soluție de silicat de sodiu și hidroxid de sodiu (8M). Raportul dintre soluțiile de

silicat de sodiu și hidroxid de sodiu a fost 2,5. Proprietățile fizico-mecanice ale betoanelor ecologice realizate pe bază de cenușă zburătoare sau substituție a acesteia cu praf de marmură (10% și 25%), realizate atât cu tratament termic (70°C, 24H) sau fără (23°C) sunt prezentate în acest capitol, împreună cu evaluarea compozițională prin metoda difracției cu raze X (XRD) pe materii prime, caracterizarea betonului ecologic realizat cu tratament termic sau fără, absorbțiile de apă ale betoanelor ecologice și evaluarea microscopică a acestora.

Tabel 7.6. Proprietățile fizico mecanice ale betoanelor ecologice

Materii prime Na ₂ SiO ₃ /NaOH =2,5	Densitatea aparentă (kg/m ³)						Rezistența la întindere prin încovoiere R _t (N/mm ²)						Rezistența la compresiune R _c (N/mm ²)						
	70°C, 24H			23°C			70°C, 24H			23°C			70°C, 24H			23°C			
	Zile	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28
100%FA		1720/1700/1670			1900/1740/1800			3,8/4,5/4,8			1,7/3,3/3,2			22,3/23,3/23,4			4,5/11,9/17,7		
90%FA+10%MD		1780/1760/1730			1950/1910/1880			3,1/3,3/3,8			1,7/2,8/3,4			21,9/22,3/22,4			4,2/9,7/16,9		
75%FA+25%MD		1850/1840/1820			1980/1940/1910			2,6/2,9/3,3			1,3/2,8/3,8			16,8/17,3/18,0			3,2/9,5/17,6		

Tabel 7.7. Rezistențe la compresiune ale betoanelor geopolimere pe bază de cenușă zburătoare

Molaritate / Soluții alcaline		Rc (N/mm²)	Zile	Materie primă (%)	Tratament termic		Ref. -	Rezultate obținute experimental
					°C	ore		
Tratament termic 70°C, 24H								
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	17	7	FA (100)	60	24	[71]	
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	20	7	FA (100)	30	24	[71]	
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	20,3	7	FA (100)	70	24	[61]	
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	20,5	7	FA (100)	70	24	[61]	
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	22,3	7	FA (100)	70	24	-	X
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	57	7	FA (100)	60	24	[71]	
Temperatură ambiantală (23°C)								
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	4,5	7	FA (100)	70	24	-	X
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	11,9	14	FA (100)	70	24	-	X
NaOH (8)	Na ₂ SiO ₃	17,7	28	FA (100)	70	24	-	X

Capitolul 7 însumează concluziile generale ale temei prezentate, precum și originalitatea și contribuțiile inovative ale prezentei teze de doctorat.

Având în vedere rezultatele obținute în ceea ce privește rezistența la compresiune (22,3 N/mm²) la vârsta de 7 zile, parametrul fundamental pentru stabilirea direcțiilor de utilizare preconizate, betonul ecologic pe bază de lianți minerali activați alcalini pe bază de cenușă zburătoare, poate fi asimilat cu betonul clasic cu ciment Portland, încadrat în clasa de beton C16/20. Prin optimizarea și testarea rețetelor propuse în prezenta cercetare se va avea în vedere dezvoltarea de elemente de construcții prefabricate de mici dimensiuni (dale, pavele, borduri, panouri, etc.)

7.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei

Originalitatea și contribuțiile inovative ale programului de cercetare derivă din următoarele:

- Abordarea cercetării aplicative pentru materii prime locale, provenite din industria românească, cu compoziție oxidică și caracteristici structurale specifice, imprimă un puternic caracter de noutate acestei cercetări
- Proiectarea compozițională a liantului geopolimer pe baza analizei și sintezei raportărilor din literatura de specialitate care au fost aplicate în corelație cu specificul materiilor prime locale utilizate

- Identificarea raportului $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ și a concentrației molare a soluției de NaOH astfel încât, în condițiile specifice de compuși oxidici și caracteristici ale materiilor prime, să se obțină materiale geopolimere cu performanțele cele mai bune

- Analiza posibilităților de substituție a cenușii zburătoare (F.A.) cu praf de marmură (M.D.) în diferite procente (10%, 25%, 50%) și impactul acestora asupra performanțelor fizico-mecanice și aspectelor de microstructură a noului compozit geopolimer

- Studiarea posibilității de substituție a cenușii zburătoare (F.A.) cu zgură de furnal (B.F.S.) în diferite procente (10%, 25%, 50%) și studiarea impactului acestora asupra performanțelor fizico-mecanice și aspectelor de microstructură a noului compozit geopolimer

- Introducerea diferitelor adaosuri în amestecul de materii prime precum trioxid de fier (Fe_2O_3), oxid de calciu (CaO), dioxid de siliciu (SiO_2), oxid de magneziu (MgO), precum și perlit și analiza și impactul acestora asupra performanțelor fizico-mecanice ale geopolimerului

- Realizarea lianturilor ecologice și a betonului ecologic activat alcalin prin două metode: cu tratament termic (70°C, 24H) și fără tratament termic, la o temperatură ambientală (23°C), constituie un alt element de originalitate a acestui studiu.

- Studiarea performanțelor geopolimerilor și analiza influenței tratamentului termic asupra acestora

- Proiectarea compozițională a betonului ecologic activat alcalin prin substituirea cenușii zburătoare cu praf de marmură (în proporție de 10% și 25%) și introducerea agregatelor de râu sort 0-8 mm.

- Analiza impactului asupra performanțelor fizico – mecanice a acestor betoane ecologice realizate cu tratament termic (70°C, 24H) sau lipsei acestuia la o temperatură ambientală 23°C.

- Dezvoltarea tehnologiei de realizare a unui *produs de tip element de placare din microbeton geopolimer activat alcalin, fără conținut de ciment*, cu protejarea dreptului de autor prin Cerere de Brevet de Invenție: nr. A/00481 din 09.08.2022.

Rezultatele cercetărilor au fost diseminate prin:

- Patru rapoarte de progres științific susținute în fața comisiei de îndrumare și examinare

- Publicarea de diferite articole în reviste indexate ISI sau BDI.

- Participare la diferite Saloane de invenție, unde s-au obținut diferite medalii.

- Depunerea unei Cereri de Brevet de Invenție: nr. A/00481 din 09.08.2022

Procedeu de realizare și elemente de placare din microbeton geopolimer activat alcalin, fără conținut de ciment, titular Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Construcții, Urbanism și Dezvoltare Teritorială Durabilă URBAN-INCERC (Anexa A).

REFERINȚE

[1]	M. I. Abdul Alem and P. D. Arumairaj, "Geopolymer concrete - A review," <i>International Journal of Engineering Science and Engineering Technologies</i> , vol. 1, no. 2, pp. 118-122, 2012.
[2]	J. Davidovits, "Geopolymers: man-made rocks geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement," <i>Journal of Material Education</i> , vol. 16, pp. 911-939, 1994a.
[3]	D. Roy, "Alkali-activated cements opportunities and challenges," <i>Cement and Concrete Research</i> , vol. 29, no. 2, pp. 249-254., 1999.
[4]	C. Shi and J. Qian, High Performance Cementing Materials from Industrial Recommended practice, Australia: Concrete institute, 2011.
[5]	A. O. Purdon, "The action of alkalis on blast-furnace slag," <i>J Soc Chem Ind</i> , vol. 59, pp. 191-202, 1940.
[6]	V. Glukhovsky, Soil silicates, Kiev: Gosstroyizdat Ukrainy Publishing, 1959.
[7]	J. Davidovits, "Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer, Geopolymer Institute.," 2005.
[8]	J. T. van Dam, "Federal highway administration office of pavement technology," <i>CPTP TechBrief: Geopolymer concrete</i> .
[9]	S. J. Nematollahi B., "Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer," <i>Materials and Design</i> , vol. 57, pp. 667-672, 2014.
[10]	P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil and V. Sirivivatnanon, "Kinetics of geopolymerisation: Role of Al ₂ O ₃ and SiO ₂ ," <i>Cem. Conc. Res.</i> , vol. 37, no. 4, pp. 512-518, 2007.
[11]	O. Bosoaga Masek and J. E. Oakey, "CO ₂ capture technologies for cement Industry," <i>Energy. Procedia</i> , vol. 1, pp. 133-140, 2009.
[12]	L. Barcelo, L. Kline, G. Walenta and E. Gartner, "Cement and carbon emissions," <i>Mater. Struct.</i> , vol. 47, pp. 1055-1065, 2014.
[13]	P. Duxon, A. Fernande-Jimenez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo and J. S. van Deventer, "Geopolymer technology: the current state of the art," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, pp. 2917-2933, 2007c.
[14]	P. Duxon, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo and J. S. van Deventer, "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete,'" <i>Cem. Concr. Res</i> , vol. 37, pp. 1590-1597, 2007b.
[15]	" http://www.sciencedirect.com ," [Online].
[16]	"Directive 203/87/Ec, European Union CO ₂ emissions trading Scheme".
[17]	C. Bohringer and A. Lange, Efficiency, compensation and discrimination: what is at stake when implementing the EU emissions trading scheme?, Centre for European Economic Research, University of Heidelberg, Germany., 2003.
[18]	K. Komnitsas and D. Zaharaki, "Geopolymerisation: A review and prospects for the

	minerals industry," <i>Minerals Engineering</i> , vol. 20, pp. 1261-1277, 2007.
[19]	J. Davidovits, in 43. <i>Geopolymer chemistry and applications 3rd edition</i> , Saint-Quentin: Institute Geopolymer - France., 2011.
[20]	J. Giancaspro, P. N. Balaguru and R. E. Lyon, "Use of inorganic polymer to improve the fire response of balsa sandwich structures," <i>Journal of Materials in Civil Engineering</i> , vol. 18, pp. 390-397, 2006.
[21]	K. Goretta, J. Fuller and E. Crawley, "Geopolymers," Air Force Office of Scientific Research Report, Document # OSR-H-05-05., 2006.
[22]	J. Davidovits, "Geopolymers: man-made rocks geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement," <i>Journal of Material Education</i> , vol. 16, pp. 911-939, 1994a.
[23]	J. Davidovits, "Properties of geopolymer cements.," in <i>First International Conference on Alkaline Cements and Concretes</i> , Kiev, Ukraine, Technical University, 1994b, pp. 131-149.
[24]	J. Davidovits, "30 years of successes and failures in geopolymer applications, market trends and potential breakthroughs," in <i>Geopolymer Conference</i> , Melbourne, Australia., 2002.
[25]	M. M. Abullah, K. Hussin, M. Bnhussain, K. Ismail and N. Ibrahim, "Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement - A Review," <i>International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology</i> , vol. 6, no. 1, pp. 35-44, 2011.
[26]	C. G. Arenas, M. Marrero, C. Leiva, J. S. Guzman and L. F. Arenas, "High fire resistance in blocks containing coal combustion fly ashes and bottom Ash," <i>Waste Management</i> , vol. 31, no. 8, pp. 1783-1788, 2011.
[27]	C. Arenas, C. Leiva, L. F. Vilches and H. Cifuentes, "Use of co-combustion bottom ash to design an acoustic absorbing material for highway noise barriers," <i>Waste Management</i> , vol. 33, no. 11, pp. 2316-2321, 2013.
[28]	I. B. Topcu and M. U. Toprak , "Properties of geopolymer from circulating fluidized bed combustion coal bottom ash," <i>Materials Science and Engineering</i> , vol. A528, pp. 1472-1477, 2011.
[29]	S. H. Kim, G. S. Ryu, K. T. Koh and J. H. Lee, "Flowability and strength development characteristics of bottom ash based geopolymer," <i>World Academy of Science, Engineering and Technology</i> , vol. 70, pp. 53-59, 2012.
[30]	J. C. Swanepoel and C. A. Strydom, "Utilisation of fly ash in a geopolymeric material," <i>Applied Geochemistry</i> , vol. 17, pp. 1143-1148, 2002.
[31]	K. C. Goretta, F. Gutierrez-Mora, D. Singh, J. L. Routbort, G. C. Lukey and J. S. van Deventer, "Erosion of geopolymers made from industrial waste," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, pp. 3066-3072, 2007.
[32]	J. van Jaarsveld, J. van Deventer and G. Lukey, "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers," <i>Chemical Engineering Journal</i> , vol. 89, no. 1, pp. 63-73, 2002.
[33]	E. A. Wovchko, J. C. Camp, J. A. Glass and J. T. Yates, "Active Sites on SiO ₂ - Role in

	CH3OH Decomposition," <i>Jr. Langmuir</i> , vol. 11, p. 2592, 1995.
[34]	S. E. Wallah and B. V. Rangan, "Low-Calcium Fly Ash based Geopolymer Concrete: Long term properties," Research Report GC 2. 1 (1), 5., 2006.
[35]	X. Y. Zhuang, L. Chen, S. Komarneni , C. H. Zhou, D. S. Tong, H. M. Yang, W. H. Yu and H. Wang, "Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications," <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 125, pp. 253-267, 2016.
[36]	A. Fernandez-Jimenez and A. Palomo, "Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator," <i>Cement and Concrete Research</i> , vol. 35, no. 10, pp. 1984-1992, 2005b.
[37]	A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo and M. Criado, "Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators," <i>Materiales de Construcción</i> , vol. 56, pp. 51-65, 2006.
[38]	J. L. Provis, C. Z. Yong, P. Duxson and J. van Deventer, "Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers," <i>Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects</i> , vol. 336, pp. 57-63, 2009.
[39]	J. Davidovits, "Polymers and geopolymers," Geopolymer chemistry and Applications, Institut Géopolymère, France, 1-16, 2008.
[40]	A. Koleżyński , M. Król and M. Żychowicz , "The structure of geopolymers – Theoretical studies," <i>Journal of Molecular Structure</i> , vol. 1163, pp. 465-471, 2018.
[41]	S. V. Patankar, S. S. Jamkar and D. D. More, "Effect of Concentration of Alkaline Solutions on the development of Geopolymer Mortar," in <i>2nd International conference on Engineering Technology, Science and Management Innovation</i> , Chandigarh, India, 2017.
[42]	T. Swan, "Development of self-cured geopolymer cement A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy," Department of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering Brunel University London, London, 2016.
[43]	T. Sujatha, K. Kannapiran and S. Nagan, "Strength assessment of heat cured geopolymer concrete slender column," <i>Asian Journal of Civil Engineering</i> , vol. 13, no. 5, pp. 635-646, 2012.
[44]	A. Palomo, M. W. Grutzeck and M. T. Blanco , "Alkali-Activated Fly Ashes, A Cement for the Future," <i>Cement and Concrete Research</i> , vol. 29, no. 8, pp. 1323-1329, 1999.
[45]	T. Cheng and J. Chiu, "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag," <i>Minerals Engineering</i> , vol. 16, no. 3, pp. 205-210, 2003.
[46]	V. Barbosa, K. MacKenzie and C. Thaumaturgo, "Synthesis and Characterization of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers," <i>International Journal of Inorganic Materials</i> , vol. 2, no. 4, pp. 309-317, 2000.
[47]	H. Xu and J. S. van Deventer, "The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals," <i>International Journal of Mineral Processing</i> , vol. 59, no. 3, pp. 247-266, 2000.
[48]	J. Davidovits, "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology," in <i>Geopolymer '99 International Conference, France, 9-93.</i> , 1999.

[49]	A. Teixeira-Pinto, P. Fernandes and S. Jalali, "Geopolymer Manufacture and Application – Main problems When Using Concrete Technology," in <i>Geopolymers 2002 International Conference, Melbourne, Australia, Siloxo Pty. Ltd.</i> , 2002.
[50]	R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelly and H. E. Davis, "Properties Of Cements And Concretes Containing Fly Ash," <i>Journal Proceedings</i> , vol. 33, no. 5, pp. 577-612, 1937.
[51]	R. C. Joshi and R. P. Lohtia, Fly Ash in Concrete: Production, Properties and Uses, Overseas Publishers Association, Amsterdam, Netherlands., 1997.
[52]	"ASTM C 618 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," 2003.
[53]	"ACI Committee 232," 2004.
[54]	A. Islam, U. Alengaram, M. Jumaat and I. Bashar, "The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar.," <i>Materials & Design.</i> , vol. 56, pp. 833-841, 2014.
[55]	P. K. Mehta, "Concrete technology for sustainable development," <i>Concrete International</i> , vol. 21, pp. 47-53, 1999.
[56]	V. Malhotra, "Making concrete" greener" with fly ash," <i>Concrete International</i> , vol. 21, pp. 61-66, 1999.
[57]	A. K. Thakur, A. Pappu and V. K. Thakur, "Synthesis and characterization of new class of geopolymer hybrid composite materials from industrial wastes," <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 230, pp. 11-20, 2019.
[58]	ACCA, "Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report," CO: American Coal Ash Association. Retrieved from: http://www.acaaua.org/Portals/9/Files/PDFs/revisedFINAL2012CCPSurveyReport.pdf , Aurora,U.S.A., 2013.
[59]	S. Dhadse, P. Kumari and L. J. Bhagia, "Fly ash Characterization, Utilization and Government Initiatives in India - A review," <i>Journal of Scientific and Industrial Research</i> , vol. 67, pp. 11-18, 2008.
[60]	" https://www.greenpeace.org/romania ," [Online].
[61]	A. V. Lăzărescu, "Teză de doctorat - Betoane alternative - betonul geopolimer," Universitatea Tehnică din Cluj Napoca, Facultatea de Construcții, Cluj Napoca, 2019.
[62]	F. C. Christy and D. Tensing, "Greener building material with fly ash," <i>Asian Journal of Civil Engineering</i> , vol. 12, pp. 87-105, 2010.
[63]	N. Moreno, X. Querol, J. M. Andrés, . K. Stanton, M. Towler, M. Jurcovicova and R. Jones, "Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes," <i>Fuel</i> , vol. 84, pp. 1351-1563, 2005.
[64]	N. W. Chen-Tan, A. Van Riessen, C. V. Ly and D. Southam, "Determining the reactivity of a fly ash for production of geopolymer," <i>Journal of the American Ceramic Society</i> , vol. 92, pp. 881-887, 2009.
[65]	J. Temuujin, A. van Riessen and R. Williams, "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes," <i>Journal of Hazardous Materials</i> , vol. 167, pp. 82-88, 2009.

[66]	T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash elevated temperature curing," <i>Cem. Concr. Res.</i> , vol. 35, pp. 1224-1232, 2005.
[67]	T. Tho-in, V. Sata, P. Chindaprasirt and C. Jaturapit, "Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 30, pp. 366-371, 2012.
[68]	E. I. Diaz and E. N. Allouche, "Recycling of Fly Ash into Geopolymer Concrete: Creation of a Database," in <i>Green Technologies Conference</i> , Grapevine, Texas, USA, 1-7, 2010.
[69]	F. Puertas, S. Martinez-Ramirez, S. Alonso and T. Vazquez, "Alkali activated fly ash/slag cements: Strength behavior and hydration products," <i>Cement and Concrete Research</i> , vol. 30, no. 10, pp. 1625-1632, 2000.
[70]	A. Fernandez-Jimenez and A. Palomo, "Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator," <i>Cement and Concrete Research</i> , vol. 35, no. 10, pp. 1984-1992, 2005b.
[71]	D. Hardjito and . B. V. Rangan, "Development and Properties of Low-calcium Fly ash-based geopolymer concrete," Technical Report GC1, Civil Engineering Faculty, Technical University, Perth, Australia., 2005.
[72]	S. E. Wallah and B. V. Rangan, "Low-Calcium Fly Ash based Geopolymer Concrete: Long term properties," Research Report GC 2. 1 (1), 5., 2006.
[73]	D. Sumajouw , D. Hardjito, S. Wallah and B. Rangan, "Fly ash-based geopolymer concrete: study of slender reinforced columns," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, no. 9, pp. 3124-3130, 2007.
[74]	M. Olivia and H. R. Nikraz, "Durability of Fly Ash Geopolymer Concrete in a Seawater Environment," in <i>25th Biennial Conference of Concrete Institute of Australia Perth</i> , Perth Australia, 2011.
[75]	H. Baykara, M. Cornejo, A. Espinoza, E. García and N. Ulloa, "Preparation, characterization, and evaluation of compressive strength of polypropylene fiber reinforced geopolymer mortars," <i>Heliyon</i> 6, vol. 6, pp. 1-10, 2020.
[76]	H. A. Abdel-Gawwad and S. Abd El-Aleem, "Effect of reactive magnesium oxide on properties of alkali activated slag geopolymer cement pastes," <i>Ceramics – Silikáty</i> , vol. 59, no. 1, pp. 37-47, 2015.
[77]	Z. Lou, Q. Ye , H. Chen, Y. Wang and J. Shen, <i>J. Chin. Ceram. Soc.</i> , vol. 430, p. 26, 1998.
[78]	P. Gao, S. Wu, P. Lin , . Z. Wu and M. Tang, <i>Chin. J. Inorg. Chem.</i> , vol. 23, p. 1063, 2007.
[79]	W. Shen, Y. Wang, T. Zhang, M. Zhou, J. Li and X. Cui, <i>J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci.</i> , vol. 26, p. 121, 2011.
[80]	C. Shi, P. V. Krivenko and D. M. Roy, "Alkali-activated cements and concretes," <i>Taylor & Francis</i> , 2006.
[81]	M. A. Shand, "The chemistry and technology of magnesia," in <i>John Wiley & Sons, Ltd.</i> , Hoboken, New Jersey, 2006.
[82]	M. A. Hossain, K. M. Hossain, T. Manzur, M. J. Hassan and D. Sood, "Fresh and Hardened Properties of Engineered Geopolymer Composite with MgO," in

	<i>Proceedings of the 5rd International Conference on Civil Structural and Transportation Engineering (ICCSTE'20)</i> , Niagara Falls, Canada Virtual conference, November 2020, doi:10.11159/iccste20.244, 2020, p. 244.
[83]	L. Zhaoheng, Z. Wei, W. Ruilan, C. Fangzhu, J. Xichun and G. Peitong, "Effects of Reactive MgO on the Reaction Process of Geopolymer," <i>Materials</i> , vol. 12, p. 526, 2019.
[84]	W. W. Zailani, M. M. Abdullah, M. F. Arshad, D. D. Burduhos-Nergis and M. F. Tahir, "Effect of Iron Oxide (Fe ₂ O ₃) on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer," <i>Materials Science and Engineering, International Conference on Innovative Research - ICIR EUROINVENT 2020</i> , p. 877, 2020.
[85]	J. Davidovits, "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," <i>Journal of Thermal Analysis</i> , vol. 37, no. 8, pp. 1633-1656, 1991.
[86]	M. Al Bakri, H. Mohammed, H. Kamarudin, K. Niza and Y. Zarina, "Review of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Without Portland Cement," <i>Journal of Engineering and Technology Research</i> , vol. 3, no. 1, pp. 1-4, 2011.
[87]	M. Cannio, R. Cyriaque, L. Myllyam, R. Rosa, E. Kamseu, U. Chinje and C. Leonelli, "Microstructure and engineering properties of Fe ₂ O ₃ (FeO)-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ based geopolymer composites," <i>J. Clean. Prod.</i> , vol. 199, pp. 849-859, 2018.
[88]	D. D. Burduhos Nergis, P. Vizureanu and O. Corbu, "Synthesis and Characteristics of Local Fly Ash Based Geopolymers Mixed with Natural Aggregates" <i>Revista de chimie</i> , vol. 70, no. 4, pp. 1262-1267, 2019.
[89]	C. Rahmawati, S. Aprilia, T. Saidi and T. B. Aulia, "Rahmawati C., ApriliaS., Saidi T., Aulia T. B. (2021) Current development of geopolymer cement with nanosilica and cellulose nanocrystals," <i>Annual Conference on Science and Technology Research (ACOSTER) 2020, Journal of Physics: Conference Series 1783 (202, 2021.</i>
[90]	K. Gao, L. K. Lin, D. Wang and K. L. Hwang, "Effect of nano - SiO ₂ on the alkali - activated characteristics of metakaolin - based geopolymers," <i>Construct. Build. Mater.</i> , vol. 48, pp. 441-447, 2013.
[91]	M. Aly, M. S. Hashmi, A. G. Olabi and M. Messeiry, "Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behavior of waste-glass cement mortar," <i>Mater. Des.</i> , vol. 33, pp. 127-135, 2012.
[92]	M. H. Khater, "Effect of nano - silica on microstructure formation of low - cost geopolymer binder," <i>Nanocomposites</i> , vol. 2, pp. 84-97, 2016a.
[93]	M. H. Khater, "Physicomechanical properties of nano - silica effect on geopolymer composites," <i>J. Build. Mater. Struct.</i> , vol. 3, pp. 1-14, 2016b.
[94]	H. Assaedi, F. U. Shaikh and I. M. Low, "Effect of nanoclay on durability and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites," <i>J. Asian Ceram. Soc.</i> , vol. 5, no. 1, pp. 62-70, 2017.
[95]	D. Adak, M. Sarkar and S. Mandal, "Effect of nano - silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar," <i>Construct. Build. Mater.</i> , vol. 70, pp. 453-459, 2014.
[96]	F. U. Shaikh, S. W. Supit and P. K. Sarker, "A study on the effect of nano silica on

	compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes," <i>Mater. Des.</i> , vol. 60, pp. 433-442, 2014.
[97]	L. Senff, D. Hotza, W. Repette, V. Ferreira and J. Labrincha, "Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars," <i>Adv. Appl. Ceram.</i> , vol. 109, no. 2, pp. 104-110, 2010.
[98]	H. Assaedi, F. U. Shaikh and I. M. Low, "Influence of mixing methods of nano silica on the microstructural and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites," <i>Construct. Build. Mater.</i> , vol. 123, pp. 541-552, 2016.
[99]	S. Nasir, K. Rabinder, Z. Muhammad and F. T. Rana, "Effects of modified metakaolin using nano - silica on the mechanical properties and durability of concrete," <i>Materilas</i> , vol. 12, no. 14, p. 2291, 2019.
[100]	Z. Zeidi, M. Ltifi and I. Zafar, "Synthesis and attributes of nano - SiO ₂ local metakaolin based – geopolymer," <i>Journal of Building Engineering</i> , vol. 33, 2021.
[101]	A. M. Rashad, "A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash," <i>Mater. Des.</i> , vol. 53, pp. 1005-1025, 2014.
[102]	S. Saha and C. Rajasekaran, "Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag," <i>Constr. Build. Mater.</i> , vol. 146, pp. 615-620, 2017.
[103]	J. Shang, J. G. Dai, T. J. Zhao, S. Y. Guo and P. Zhang, "Alternation of traditional cement mortars using fly ash-based geopolymer mortars modified by slag," <i>J. Clean. Prod.</i> , vol. 203, pp. 746-756, 2018.
[104]	N. K. Lee and H. K. Lee, "Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature," <i>Constr. Build. Mater.</i> , vol. 49, pp. 1201-1209, 2013.
[105]	I. Pern and T. Hanzlíček, "The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method," <i>J. Clean. Prod.</i> , vol. 112, pp. 1150-1155, 2016.
[106]	A. Pappu, M. Saxena and S. R. Asolekar, "Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials," <i>Build. Environ.</i> , vol. 42, pp. 2311-2320, 2007.
[107]	A. K. Thakur, A. Pappu and V. K. Thakur, "Resource efficiency impact on marble waste recycling towards sustainable green construction materials," <i>Curr. Opin. Green Sustain. Chem.</i> , vol. 13, pp. 91-101, 2018.
[108]	Y. Zhang, X. Guo, Y. Yao, F. Wu, C. Zhang and J. Lu, "Synthesis of Mg-Decorated Carbon Nanocomposites from MesoCarbon MicroBeads (MCMB) Graphite: Application for Wastewater Treatment," <i>ACS Omega</i> , vol. 1, pp. 417-423, 2016.
[109]	K. Yamanel, "Investigation of Kayseri area properties of waste marble powder mortar," Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, MSc Thesis, 2015.
[110]	T. W. Cheng, Y. C. Ding, W. H. Lee and P. C. Lu, "A Study on Marble-Based Geopolymer," in <i>MATEC Web of Conferences 97</i> , 2017.

[111]	C. Chen , W. Gong , W. Lutze , I. L. Pegg and J. Zhai , "Kinetics of fly ash leaching in strongly alkaline solutions," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 46, pp. 590-597, 2011.
[112]	D. Khale and R. Chaudhary, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, pp. 729-746, 2007.
[113]	W. K. Lee and J. S. van Deventer, "Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions," <i>Colloids Surf.</i> , vol. 211, no. 1, pp. 49-66, 2002.
[114]	A. Mikuni, R. Komatsu and K. Ikeda, "Dissolution properties of some fly ash fillers applying to geopolymeric materials in alkali solution," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, pp. 2953-2957, 2007.
[115]	O. M. Omar, G. D. Abd Elhameed, H. A. Mohamadien and M. A. Sherif, "Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties," <i>HBRC Journal</i> , vol. 8, pp. 193-203, 2012.
[116]	G. C. Ulubeyli and . R. Artir, "Properties of Hardened Concrete Produced by Waste Marble Powder," <i>Procedia - Social and Behavioral Sciences</i> , vol. 195, pp. 2181-2190, 2015.
[117]	J. L. Provis and J. S. van Deventer, <i>Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications</i> , 2009.
[118]	M. Esaifan, H. Khoury, I. Aldabsheh, H. Rahier, M. Hourani and J. Wastiels, "Hydrated lime/potassium carbonate as alkaline activating mixture to produce kaolinitic clay based inorganic polymer," <i>Applied Clay Science</i> , vol. 126, pp. 278-286, 2016.
[119]	C. Monnin and M. Dubois, "Thermodynamics of the LiOH+H ₂ O system.," <i>J. Chem. Eng. Data</i> , vol. 50, no. 4, pp. 1109-1113, 2005.
[120]	C. Kurt and J. Bittner, "Sodium hydroxide.," in <i>Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry</i> , Wiley-VCH Verlag, 2006.
[121]	J. M. Simonson, R. E. Mesmer and P. S. Rogers, "The enthalpy of dilution and apparent molar heat capacity of NaOH(aq) to 523 K and 40 MPa," <i>J. Chem. Thermodyn.</i> , vol. 21, pp. 561-584, 1989.
[122]	R. T. Pabalan and K. S. Pitzer, "Thermodynamics of NaOH(aq) in hydrothermal solutions," <i>Geochimica et Cosmochimica Acta</i> , pp. 829-837, 1987.
[123]	J. L. Provis and J. S. van Deventer, "Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications," <i>Materials, Science, Engineering , Geology</i> , 2009.
[124]	S. Alonso and A. Palomo, "Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures:influence of temperature, activator concentration and solids ratio," <i>Materials Letters</i> , vol. 47, no. 1, pp. 55-62, 2001.
[125]	P. Chindaprasirt and W. Chalee, "Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 63, pp. 303-310, 2014.
[126]	P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," <i>Waste Management</i> , vol. 29, pp. 539-543, 2009.

[127]	K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul and P. Chindaprasit, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature," <i>Fuel</i> , vol. 90, pp. 2118-2124, 2011.
[128]	D. B. Raijiwala, H. S. Patil and I. U. Kundan, "Effect of Alkaline Activator on the Strength and Durability of Geopolymer Concrete," <i>Journal of Engineering Research and Studies</i> , vol. 3, pp. 18-21, 2012.
[129]	P. Duxson, S. W. Mallicoat, G. C. Lukey, W. M. Kriven and J. S. van Deventer, "The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers," <i>Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering</i> , vol. 292, no. 1, pp. 8-20, 2007.
[130]	E. Gartner, "Industrially interesting approaches to "low-CO ₂ " cements," <i>Cem. Concr. Res.</i> , vol. 34, no. 9, pp. 1489-1498, 2004.
[131]	V. C. Wiley, ULLMANN'S Encyclopedia of industrial chemistry (7 th ed). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
[132]	T. Y. Yang, C. C. Chou and C. C. Chien, "The effects of foaming agents and modifiers on a foamed-geopolymer," in <i>The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12)</i> , Seoul, Korea, 2012.
[133]	"Recommended practice," Geopolymer concrete – Concrete Institute of Australia, 2011.
[134]	B. Chatveera and N. Makul, "Properties of geopolymer mortar produced from fly ash and rice husk ash: Influences of fly ash-rice husk ash ratio and Na ₂ SiO ₃ -NaOH ratio under curing by microwave energy," <i>KMUTT Research and Development Journal</i> , vol. 35, no. 3, pp. 299-309, 2012.
[135]	S. Taebuanhuad, U. Rattanasak and S. Jenjirapanya, "Strength behavior of fly ash geopolymer with microwave pre-radiation curing," <i>The Journal of Industrial Technology</i> , vol. 8, no. 2, pp. 1-8, 2012.
[136]	D. Dutta, S. Thokchom, P. Ghosh and S. Ghosh, "Effect of silica fume additions on porosity of fly ash geopolymers," <i>Journal of Engineering and Applied Sciences</i> , vol. 5, no. 10, pp. 74-79, 2010.
[137]	T. Suwan, "Development of self-cured geopolymer cement," A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering Brunel University London, 2016.
[138]	Recommended practice, Geopolymer concrete, Sydney, Australia: Concrete Institute of Australia, 2011.
[139]	A. Hajimohammadi, J. . L. Provis and J. S. van Deventer, "Time-resolved and spatially-resolved infrared spectroscopic observation of seeded nucleation controlling geopolymer gel formation," <i>Journal of Colloid and Interface Science</i> , vol. 357, pp. 384-392, 2011.
[140]	C. A. Rees, J. L. Provis, G. C. Lukey and J. S. van Deventer, "Attenuated total reflectance Fourier transform infrared analysis of fly ash geopolymer gel aging," <i>Langmuir</i> , vol. 23, no. 15, pp. 8170-8179, 2007a.
[141]	C. H. Ruscher, E. Mielcarek, W. Lutz, A. Ritzmann and W. M. Kriven, "Weakening of

	alkaliactivated metakaolin during aging investigated by the molybdate method and infrared absorption spectroscopy," <i>Journal of the American Ceramic Society</i> , vol. 93, p. 2585, 2010.
[142]	A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, "Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure," <i>Micropor. Mesopor. Mater.</i> , vol. 86, no. 1-3, pp. 207-214, 2005a.
[143]	N. Jaggi and D. R. Vij, "FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY," <i>Handbook of Applied Solid State Spectroscopy</i> , Springer US., pp. 411-450, 2006.
[144]	S. J. Lyu, T. T. Wang, T. W. Cheng and T. H. Ueng, "Main factors affecting mechanical characteristics of geopolymer revealed by experimental design and associated statistical analysis," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 43, no. 0, pp. 589-597, 2013a.
[145]	I. García-Lodeiro, A. Fernandez-Jimenez and A. Palomo, "Effect of Calcium Additions on N-A-S-H Cementitious Gels," <i>Journal of the American Ceramic Society</i> , 2010.
[146]	M. Criado, A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, "Alkali activation of fly ash:Effect of the SiO ₂ /Na ₂ O ratio," <i>Microporous and Mesoporous Materials</i> , vol. 106, no. 1-3, pp. 1480-191, 2007.
[147]	I. Ismail, S. A. Bernal, J. Provis and S. Hamdam, "Drying-induced changes in the structure of alkali-activated pastes," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 48, no. 9, pp. 3566-3577, 2013.
[148]	X. Guo, H. Shi and W. A. Dick, "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer," <i>Cement and Concrete Composites</i> , vol. 32, no. 2, pp. 142-147, 2010.
[149]	Y. M. Liew, H. Kamarudin, A. M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul, C. M. Ruzaidi and C. V. Heah, "Optimization of solids-to-liquid and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 37, pp. 440-451, 2012.
[150]	G. M. Nasab, F. Golestanifard and K. J. Mac Kenzie, "The Effect of the SiO ₂ /Na ₂ O Ratio in the Structural Modification of Metakaolin-Based Geopolymers Studied by XRD, FTIR and MAS-NMR," <i>Journal of Ceramic Science and Technology</i> , vol. 5, no. 3, pp. 185-192, 2014.
[151]	Z. Zhang, J. Provis, H. Wang and F. Bullen, "Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide," <i>Thermochimica Acta</i> , vol. 539, pp. 23-33, 2012.
[152]	D. Jozić, D. Tiblijas, S. Zorica and S. Bernstorff, "Insitu saxs / waxes study of the developing process of geopolymer structures," in <i>ECCM15 - 15th European conference on composite materials</i> , Venice, Italy., 2012.
[153]	S. J. Lyu, Y. H. Hsiao, T. T. Wang and T. W. Cheng, "Microstructure of geopolymer accounting for associated mechanical characteristics under various stress states," <i>Cement and Concrete Research</i> , vol. 54, pp. 199-207, 2013 b.
[154]	Z. Zhang, J. Provis, H. Wang and F. Bullen, "Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of

	metakaolin," <i>Thermochimica Acta</i> , vol. 565, no. 0, pp. 163-171, 2013.
[155]	Z. Yunsheng, S. Wei and L. Zongjin, "Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement," <i>Applied Clay Science</i> , vol. 47, pp. 271-275, 2010.
[156]	S. Andini, R. Cioffi, F. Colangelo, T. Grieco, F. Montagnaro and L. Santoro, "Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products," <i>Waste Management</i> , vol. 28, no. 2, pp. 416-423, 2008.
[157]	I. N. Tchadjié, J. N. Djobo, N. Ranjbar, H. E. Tchakouté, A. Elimbi and B. B. Kenne, "Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis," <i>Ceram. Int.</i> , vol. 42, pp. 3046-3055, 2016.
[158]	M. Krol, J. Minkiewicz and W. dan Mozgawa, "IR Spectroscopy Studies of Zeolites in Geopolymeric Materials derived from Kaolinite," <i>Journal of Molecular Structure</i> , pp. 200-206, 2016.
[159]	J. N. Djobo, A. Elimbi, H. K. Tchakouté and S. Kumar, "Reactivity of volcanic ash in alkaline medium, microstructural and strength characteristics of resulting geopolymers under different synthesis conditions," <i>J. Mater. Sci.</i> , vol. 51, pp. 10301-10307, 2016.
[160]	M. F. Zawrah, R. A. Gado and R. M. Khattab, "Optimization of Slag Content and Properties Improvement of," <i>The Open Materials Science Journal</i> , vol. 12, pp. 40-57, 2018.
[161]	C. A. Rees, "Mechanisms and kinetics of gel formation in geopolymers," The University of Melbourne., 2007.
[162]	I. Spătaru, "Contribuții privind obținerea de geopolimeri prin valorificarea unor reziduuri de producție : teză de doctorat," Facultatea Dunărea de Jos Galați, Galați, 2016i.
[163]	R. A. Robayo-Salazar, R. Mejía, D. Gutiérrez and F. Puertas, "Effect of metakaolin on natural volcanic pozzolan-based geopolymer cement," <i>Appl. Clay Sci.</i> , Vols. 132-133, pp. 491-497, 2016.
[164]	Y. M. Liew, H. Kamarudin, A. M. Mustafa Al Bakri, C. M. Ruzaidi and C. V. Heah , "Optimization of solids-to-liquid and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 37, pp. 440-451, 2012.
[165]	Z. Yunsheng, S. Wei and L. Zongjin, "Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement," <i>Applied Clay Science</i> , Vols. 473-4, pp. 271-275, 2010.
[166]	Z. Yunsheng, S. Wei and L. Zongjin, "Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement," <i>Applied Clay Science</i> , vol. 47, no. 3-4, pp. 271-275, 2010.
[167]	S. H. Kim, G. S. Ryu, K. T. Koh and J. H. Lee, "Flowability and strength development characteristics of bottom ash based geopolymer," <i>World Academy of Science, Engineering and Technology</i> , vol. 70, pp. 53-59, 2012.
[168]	J. N. Djobo, A. Elimbi, H. K. Tchakouté and S. Kumar, "Reactivity of volcanic ash

	in alkaline medium, microstructural and strength characteristics of resulting geopolymers under different synthesis conditions," <i>J. Mater. Sci.</i> , vol. 51, pp. 10301-10317, 2016.
[169]	X. Gao, Q. L. Yu and H. J. Brouwers, "Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag-fly ash blends," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 80, pp. 105-115, 2015.
[170]	H. Xu and J. van Deventer, "The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspats," <i>Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects</i> , vol. 216, no. 1, pp. 27-44, 2013.
[171]	L. Weng and K. Sagoe-Crentsil, "Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I - Low Si/Al ratio systems," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, no. 9, pp. 2997-3006, 2007.
[172]	S. Andini, R. Cioffi, F. Colangelo, T. Grieco, F. Montagnaro and L. Santoro, "13. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products," <i>Waste Management</i> , vol. 28, no. 2, pp. 416-423, 2008.
[173]	M. Hu, X. Zhu and F. Long, "Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives," <i>Cem. Concr. Compos.</i> , vol. 31, no. 10, pp. 762-768, 2009.
[174]	T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash elevated temperature curing," <i>Cem. Concr. Res.</i> , vol. 35, pp. 1224-1232, 2005.
[175]	C. D. Atis, E. B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. Ilkentapar and E. Luga, "Very high strength (120 MPa) Class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration," <i>Constr Build. Mater.</i> , vol. 96, pp. 673-678, 2015.
[176]	A. M. Al Bakri Mustafa, H. Kamarudin, M. Bnhussain, I. K. Nizar, A. R. Rafiza and Y. Zarina, "The processing, characterization, and properties of fly ash based geopolymer concrete," vol. 30, pp. 90-97, 2012.
[177]	M. S. Morsy, S. H. Alsaye, Y. Al-Salloum and T. Almusallam, "Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder," <i>Arab. J. Sci. Eng.</i> , vol. 39, no. 6, pp. 4333-4339, 2014.
[178]	P. Chindaprasirt, T. Chareerat and V. Sirivivatnana, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," <i>Cement and Concrete Composites</i> , vol. 29, no. 3, pp. 224-229, 2007.
[179]	E. Álvarez-Ayuso, X. Querol X., F. Plana F., A. Alastuey, N. Moreno, M. Izquierdo, O. Font, T. Moreno, S. Diez, K. Vasquez and M. Barra, "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion f," <i>Moreno N., Izquierdo M., Font O., Moreno T., Diez S., Vázquez E., Barra M.</i> , vol. 154, pp. 175-183, 2008.
[180]	Sindhunata, J. S. van Deventer, G. C. Lukey and H. Xu, "Effect of Curing Temperature and Silicate Concentration on Fly-Ash-Based Geopolymerization," <i>Industrial and Engineering Chemistry Research</i> , vol. 45, pp. 3559-3569, 2006.
[181]	D. Hardjito and S. Fung, "Fly ash-based geopolymer mortar incorporating bottom ash," <i>Modern Applied Science</i> , vol. 4, no. 1, pp. 44-52, 2010.

[182]	D. Raijiwala and H. Patil, "Geopolymer concrete: A green concrete," in <i>2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering (ICBEE 2010), 2 to 4 November 2010, Cairo, Egypt, 2010.</i>
[183]	A. Mishra, D. Choudhary, N. Jain, M. Kumar, N. Sharda and D. Dutta, "Effect of concentration of alkaline liquid and curing time on strength and water absorption of geopolymer concrete," <i>Journal of Engineering and Applied Sciences</i> , vol. 3, no. 1, pp. 14-18, 2008.
[184]	F. Memon, M. F. Nuruddin, S. H. Khan and N. R. Shafiq, "Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete," <i>Journal of Engineering Science and Technology</i> , vol. 8, no. 1, pp. 44-56, 2013.
[185]	T. Phoo-ngernkham and T. Sinsiri, "Workability and compressive strength of geopolymer mortar from fly ash containing diatomite," <i>Engineering Journal</i> , vol. 38, no. 1, pp. 11-26, 2011.
[186]	K. Anuar, A. Ridzuan and S. Ismail, "Strength characteristics of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate," <i>International Journal of Civil and Environmental Engineering</i> , vol. 11, no. 1, pp. 59-62, 2011.
[187]	P. Chindaprasirt, T. Chareerat and V. Siricicatanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," <i>Cement Concrete Compos</i> , vol. 29, pp. 224-229, 2007.
[188]	V. Barbosa, K. Mackenzie and C. Thaumaturgo, "Synthesis and characterisation of sodium polysialate inorganic polymer based on alumina and silica," in <i>Geopolymer'99 International Conference, 30 June to 2 July 1999. Saint-Quentin, Geopolymer Institute., Saint-Quentin, 1999.</i>
[189]	P. Sukmak, S. Horpibulsuk and S. Shen, "Strength development in clay-fly ash geopolymer," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 40, pp. 566-574, 2013.
[190]	Y. Ma, J. Hu and G. Ye, "The effect of activating solution on the mechanical strength, reaction rate, mineralogy, and microstructure of alkali-activated fly ash," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 47, no. 11, pp. 4568-4578, 2012.
[191]	J. Xie, J. Yin, J. Chen and J. Xu, "Study on the geopolymer based on fly ash and slag," <i>Energy and Environment Technology</i> , vol. 3, pp. 578-581, 2009.
[192]	A. Al Bakri, H. Kamarudin, M. Binhussain and I. K. Niza, "The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers," <i>Physics Procedia</i> , vol. 22, pp. 286-291, 2011b.
[193]	P. Vora and U. Dave, "Parametric Studies on Compressive Strength of Geopolymer Concrete," <i>Procedia Engineering</i> , vol. 51, pp. 210-219, 2013.
[194]	S. Patil and Manojkumar, "Factors Influencing Compressive Strength of Geopolymer Concrete," <i>International Journal of Research in Engineering and Technology</i> , 2013372-375.
[195]	P. Rovnaník, "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 24, no. 7, pp. 1176-1183, 2010.

[196]	P. Chindaprasirt, T. Chareerat, S. Hatanaka and T. Cao, "High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash," <i>Journal of Materials in Civil Engineering</i> , vol. 23, no. 3, pp. 264-270, 2010.
[197]	A. Hounsi, G. Lecomte-Nana, G. Djétéli and P. Blanchart, "Kaolin-based geopolymers: Effect of mechanical activation and curing process," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 42, pp. 105-113, 2013.
[198]	A. V. Lăzărescu, H. Szilagyi, C. Baeră and A. Ioani, "Parameters Affecting the Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Binders–Experimental Results," <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , vol. 374, no. 1, 2018.
[199]	A. Fernández-Jiménez, I. Garcia-Lodeiro and A. Palomo, "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, no. 9, pp. 3055-3065, 2007.
[200]	D. Kong and J. Sanjayan, "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete," <i>Cement and Concrete Research</i> , vol. 40, no. 2, pp. 334-339, 2010.
[201]	X. Guo and H. Shi, "Self-solidification/stabilization of heavy metal wastes of class C fly ash-based geopolymers," <i>Journal of Materials in Civil Engineering</i> , vol. 25, no. 4, pp. 491-496, 2012.
[202]	A. Rashad and S. Zeedan, "The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 25, no. 7, pp. 3098-3107, 2011.
[203]	P. Sukmak, S. Horpibulsuk and S. Shen, "Strength development in clay-fly ash geopolymer," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 40, pp. 566-574, 2013.
[204]	O. M. Omar, A. . M. Heniegal, G. D. Abd Elhameed and H. A. Mohamadien, "Effect of Local Steel Slag as a Coarse Aggregate on Properties of Fly Ash Based-Geopolymer Concrete," <i>International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering</i> , vol. 3, no. 11, pp. 1452-1460, 2015.
[205]	A. Patil, H. S. Chore and P. A. Dode, "Effect of curing condition on strength of geopolymer concrete," <i>Advances in Concrete Construction</i> , vol. 2, no. 1, pp. 29-37, 2014.
[206]	S. Hu, H. Wang, G. Zhang and Q. Ding, "71. Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag," <i>Cement and Concrete Composites</i> , vol. 30, no. 3, pp. 239-244, 2008.
[207]	K. Anuar, A. Ridzuan and S. Ismail, "Strength characteristics of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate," <i>International Journal of Civil and Environmental Engineering</i> , vol. 11, no. 1, pp. 59-62, 2011.
[208]	S. Ahmari and L. Zhang, "Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerisation," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 29, pp. 323-331, 2012.
[209]	J. Davidovits and J. Orlinski, "Soft mineralurgy and geopolymers," in <i>33. Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88. Compiègne, France, 1, 19-24., 1988.</i>

[210]	H. Xu, "Geopolymerisation of aluminosilicate minerals," Ph.D. Thesis, department of chemical engineering, University of Melbourne, Australia.
[211]	F. Winnefeld, A. Leemann , M. Lucuk, P. Svoboda and M. Neuroth, "Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials," <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 24, no. 6, pp. 1086-1093, 2010.
[212]	D. S. Perera, O. Uchida, E. R. Vance and K. S. Finnie, "Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers," <i>Journal of Materials Science</i> , vol. 42, pp. 3099-3106, 2007.
[213]	J. Davidovits, "Properties of geopolymer cements," <i>First International Conference on Alkaline Cements and Concretes; Kiev, Ukraine, 1994: SRIBM, Kiev State Technical University</i> , pp. 131-149, 1994.
[214]	M. Albitar, "Mechanical, Durability and Structural Evaluation of Geopolymer Concretes," Thesis submitted to the Faculty of Engineering, Computer and Mathematical Sciences in total to fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philoso, 2016.
[215]	L. Tian, D. He, J. Zhao and H. Wang, "Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review," <i>Rev. Adv. Mater. Sci.</i> , vol. 60, pp. 1-14, 2021.
[216]	A. Patak, "A laboratory scale synthesis of geopolymer from construction wastes,," A thesis submitted to the central department of Chemistry Institute of Science and Technology Tribhuvan University Nepal., 2016.
[217]	E. Jean-Baptiste, "Experimental evaluation of the durability of fly ash-based geopolymer concrete in the marine environment, A Thesis," Faculty of The College of Engineering and Computer Science in Partial Fulfillment of the Requirements for degree of master of science, Florida, Atlantic University Boca Raton, 2011.
[218]	"www.geopolymer.org," [Online].
[219]	"Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates," S.U.A., 2015.
[220]	ASRO, "SR EN 12390-7:2019/AC:2021 Încercări pe beton întărit. Partea 7: Densitatea betonului întărit," 2019.
[221]	ASRO, "SR EN 196-1:2016 Metode de încercare ciment. Partea 1: Determinarea rezistenței," 2016.
[222]	M. Kaya, F. Koksall, O. Gencil and M. J. Munir, "Influence of micro Fe ₂ O ₃ and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar," <i>Journal of building Engineering</i> , vol. 52, no. 3, 2022.
[223]	J. Xiong, "Effect of Fe ₂ O ₃ on the physical property of geopolymer paste," <i>Advanced Materials Research</i> , vol. 586, pp. 126-129, 2012.
[224]	P. Baran, M. Nazarko, E. Wlosinka, A. Kanciruk and K. Zarebska, "Synthesis of geopolymers derived from fly ash with an addition of perlite," <i>Journal of Cleaner Production</i> , vol. 293, 2021.
[225]	C. Bai, G. Franchin, H. Elsayed, A. Zaggia and L. Con, "High-porosity geopolymer foams with tailored porosity for thermal insulation and wastewater treatment," <i>Journal of Materials Research</i> , vol. 33, pp. 3251-3259, 2017.

[226]	I. Lecomte, M. Liégeois, A. Rulmont and R. Cloots, "Synthesis and characterization of new inorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag," <i>Journal of materials research</i> , vol. 18, pp. 2571-2579, 2003.
[227]	P. Palmero, A. Formia, P. Antonaci, S. Brini and I. M. Tulliani, "Geopolymer technology for application-oriented dense and lightened materials. Elaboration and characterization," <i>Ceramics International</i> , vol. 41, pp. 12967-12979, 2015.
[228]	R. M. Novais, L. Buruberry, G. Ascensão and M. Seabra, "Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity," <i>Journal of cleaner production</i> , vol. 119, pp. 99-107, 2016.
[229]	P. Hlaváček, V. Šmilauer, F. Škvára, L. Kopecký and R. Sulc, "Inorganic foams made from alkali-activated fly ash: Mechanical, chemical and physical properties," <i>Journal of the European Ceramic Society</i> , vol. 35, pp. 703-709, 2015.
[230]	G. Masi, W. D. Rickard, M. C. Bignozzi and A. van Riessen, "The influence of short fibres and foaming agents on the physical and thermal behaviour of geopolymer composites," <i>Advances in Science and Technology</i> , vol. 92, p. 56, 2014.
[231]	T. Y. Yang, C. C. Chou and C. C. Chien, "The effects of foaming agents and modifiers on a foamed-geopolymer," in <i>The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12)</i> , Seoul, Korea, 2012.
[232]	F. Skvara, R. Sulc, T. Zdenek, S. Petr, S. Vit and Z. Cilova, "Preparation and properties of fly ash-based geo-polymer foams," <i>Ceramics-Silikaty</i> , vol. 58, pp. 188-197, 2014.
[233]	J. Temuujin and A. van Riessen, "Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer," <i>Journal Hazard. Mater.</i> , vol. 164, pp. 634-639, 2009a.
[234]	A. R. Aguilar, B. O. Díaz and E. J. García, "Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates," <i>Constr. Build. Mater.</i> , vol. 24, pp. 1166-1175, 2010.
[235]	M. I. Abdul Aleem and P. D. Arumairaj, "Geopolymer concrete-a review," <i>International Journal of Engineering Science & Emerging Technologies</i> , vol. 1, no. 2, pp. 118-122, 2012.