

STUDIU TEHNIC SI COMPARATIV PRIVIND SOLUTIILE TEHNICE ALE USCATOARELOR CONVECTIVE ALIMENTATE CU ENERGIE SOLARA

Denumirea proiectului:

USCATOR CU FUNCTIONARE CONTINUA, ULTRA
EFFICIENT, TOTAL AUTONOM, CU EMISII NETE ZERO.

Contract de finantare nr 28PTE/2025

Cod proiect:PN-IV-P7-7.1-PTE-2024-0039

Acronim: UCES

CUPRINS

Capitolul 1- Energia solară.....	7
1.1 Introducere	7
1.2. Energia solară în Romania	8
1.3 Energia solară solutia de decarbonizare.....	9
Capitolul 2 – Stadiul actual al cercetarii.....	10
2.1 Revizuirea literaturii de specialitate.....	10
2.1.1 Documente publicate pe an și domenii de cunoștințe conexe	10
2.1.2 Cele mai relevante tipuri și surse de publicare	12
2.1.3 Cele mai utilizate cuvinte cheie	13
2.1.4 Cei mai relevanți autori.....	14
2.1.5 Producția științifică pe țări	16
2.1.6 Cele mai citate documente	17
2.1.7 Top 10 cele mai citate articole	19
2.1.8 Rețeaua de co-apariție a cuvintelor cheie	20
2.1.9 Harta tematică a cercetării și a tendințelor viitoare de cercetare	26
2.2 Provocări și oportunități în implementarea uscătoarelor solare hibride	29
2.2.1 Provocări tehnice și operaționale în integrarea PCM	29
2.2.2 Provocări în aplicarea modelelor CFD în condiții de mediu variabile	30
2.2.3 Provocările interdisciplinare în dezvoltarea tehnologiilor de uscare solară	31
2.3 Cercetari privind solutiile constructive	32
Capitolul 3 - Uscatoare solare	38
3.1 Criterii de clasificare a uscătoarelor solare	38
3.2 Domenii de utilizare a uscătorului solar	39
3.3 Tipuri de uscatoare	39
3.3.1 Uscător solar de tip direct	40
3.3.2 Uscător solar de tip indirect	40
3.3.3 Uscător solar de tip mixt.....	40
Capitolul 4 - Procesul de uscare.....	40
4.1 Notiuni si particularități ale procesului de uscare	41
4.2 Metoda înregistrării scăderii de masă a fructelor.....	44
4.3 Teoria uscarii.....	47

4.3.1 Efectele deshidratarii asupra dezvoltarii microorganismelor și activității enzimatică	49
4.3.2 Efectele deshidratarii asupra fructelor și legumelor	50
4.3.3 Formele de legare a apei în fructe și legume	51
4.3.4 Fenomenele de difuzie a apei.....	51
4.3.5 Fazele procesului de uscare	52
4.3.6 Factorii care influențează uscarea.....	54
4.3.7 Materia primă.....	54
4.3.8 Forma și gradul de mărunțire a materiei prime	54
4.3.9 Așezarea gratarelor cu material pe carucioare	55
4.3.10 Încarcarea legumelor și fructelor pe gratare sau site	56
4.3.11 Temperatura și umiditatea aerului	57
4.3.12 Viteza aerului	59
4.3.13 Distribuția aerului	59
4.3.14 Recircularea aerului	60
4.3.15 Temperatura produsului în timpul procesului de uscare	60
4.3.16 Conținutul final de apă al produselor uscate.....	64
4.3.17 Principiile uscării legumelor și fructelor	65
4.3.18 Estimarea costului procesului de uscare	65
4.3.18.1 Costul cu energia electrică	65
4.3.18.2 Costul cu energia termică.....	66
4.3.18.3 Costul total	67
4.3.19 Productivitatea uscătoarelor.....	67
4.3.20 Analiza sistemului și performanța uscătoarelor solare	68
4.3.21 Bilantul energetic	69
4.3.22 Cinetica de uscare	69
4.3.23 Eficiența termică	70
4.3.24 Performanța generală a sistemului.....	70
4.4 Fazele uscării.....	71
4.4.1 Faza de Incalzire	71
4.4.2 Faza de Conditionare	72
4.4.3 Faza de Uscare	72
4.4.4 Faza de Egalizare	72
4.4.5 Faza de Racire.....	73
4.5 Retete pentru uscarea fructelor și legumelor	73
4.5.1 Retete pentru fructe.....	74
4.5.2 Retete pentru legume	74

Capitolul 5 - Principiile de bază folosite într-un uscător solar	75
5.1 Uscătoare cu convecție naturală.....	76
5.2 Uscătoare cu convecție forțată	76
5.3 Uscătoare tip tunel.....	77
5.4 Factori importanți de calitate	77
5.5 Co-beneficii ale uscătoarelor solare	78
5.6 Construcția uscătoarelor de fructe și legume	79
5.6.1 Grosimea și calitatea izolației	79
5.6.2 Ventilarea aerului	80
5.6.3 Sistemul de încălzire	80
5.6.4 Evacuarea aerului uzat	81
5.6.5 Umidificarea aerului	83
5.6.6 Construcția tavilor.....	83
5.6.7 Materialele utilizate	84
5.7 Componente și considerații de proiectare	85
5.7.1 Capace colectoare	85
5.7.2 Absorbant	89
5.7.3 Reflectoare	90
5.7.4 Izolator	90
5.7.5 Camera de uscare	90
5.7.6 Aspiratoare	91
5.7.7 Ventilatoare	91
5.7.8 Surse de căldură auxiliare	92
5.7.9 Sisteme de stocare a energiei	92
5.8 Surse de energie pentru uscarea alimentelor.....	101
5.9 Opărire sau blanșarea	104
5.9.1 Efectele opăririi înainte de uscare	105
5.10 Soluții de stocare a energiei în uscătorul solar.....	106
5.11 Parametrii pentru uscarea fructelor cu energie solară.....	107
5.11.1 Caracteristicile fizice ale uscătorului:	107
5.11.2 Performanță termică	107
5.11.3 Calitatea produselor uscate	107
Capitolul 6 - Soluții de uscătoare solare.....	108
6.1 Uscător solar cu convecție naturală	108
6.2 Uscătorul solar de tip tunel model Hohenheim.....	108
6.3 Echipamente pentru uscarea legumelor și fructelor realizate în România	109

6.3.1 Camera de uscare – deshidratare MIRACO	110
6.3.2 Uscătorul casnic pentru legume și fructe cu casete	110
6.3.3 Uscător-deshidratator profesional pentru fructe, legume, ciuperci	111
6.4 Echipamente pentru uscarea produselor vegetale realizate la nivel mondial	112
6.4.1 Mini-uscătorul tip Innotech – Hohenheim.....	112
6.4.2 Uscătorul pentru produse vegetale Mat-ing, Moldova	113
6.4.3 Uscătorul tip tunel cu bandă ImTech DryGenic, Olanda.....	114
6.5 Scheme clasice de uscatoare solare.....	116
6.6 Exemplu de dimensionare și proiectare a unui uscator cu două compartimente.....	119
6.6.1 Insolatie pe suprafața colectorului	119
6.6.2 Determinarea suprafeței și dimensiunii colectorului	120
6.6.3 Determinarea grosimii izolatorului de bază pentru colector	120
6.6.4 Pierderi de umiditate	121
6.6.5 Proiectarea uscatorului cu cameră de stocare termică integrată	121
6.6.6 Principii constructive	122
6.6.7 Procedura experimentală.....	122
6.6.8 Rezultate.....	123
6.6.9 Exemplu de testare	126
Capitolul 7 - Conditii de uscare convectiva	126
7.1 Condiții de uscare convectivă pentru fructe.....	126
7.2 Condiții de uscare convectivă pentru legume	127
Capitolul 8 - Automatizarea instalatiilor pentru uscare	127
8.1. Conducerea automata a instalatiilor de uscare convectiva	129
8.1.1 Uscătorul convectiv obiect al automatizării.....	129
8.1.2 Regimurile de funcționare ale uscătoarelor convective.....	131
8.1.3 Randamentul de uscare	132
8.1.4 Procesul de uscare convectivă obiect al conducerii automate	133
8.1.5 Măsurarea mărimilor care intervin în procesul de uscare.....	134
8.1.6 Mărimile de execuție ale proceselor de uscare convectivă.....	135
8.1.7 Modalități clasice de conducere automată a regimului de uscare	136
8.1.8 Reglarea automată a debitului de agent de uscare	137
8.1.9 Reglarea automată a umidității absolute	138
8.1.10 Reglarea automată a temperaturii aerului	140
8.1.11 Reglarea temperaturii pentru o variație continuă a puterii termice ..	142

8.1.12 Reglare automată a vitezei de uscare	142
Capitolul 9 - Tehnici de asistență la uscarea solară.....	144
Capitolul 10 - Modelarea proceselor de uscare solară.....	147
Capitolul 11 – Alegerea tipului de uscare	150
Capitolul 12 - Provocări și direcții pentru cercetările viitoare.....	152
Capitolul 13 - Componente recomandate pentru utilizare in proiect	154
Capitolul 14 - Concluzii	158
Referinte	160
Bibliografie.....	164

STUDIU TEHNIC SI COMPARATIV PRIVIND SOLUTIILE TEHNICE ALE USCATOARELOR CONVECTIVE ALIMENTATE CU ENERGIE SOLARA

Capitolul 1- Energia solară

1.1 Introducere

Creșterea continuă a populației globale și urbanizarea au dus la o creștere a cerințelor alimentare. Facilitățile inadecvate de depozitare și conservare a alimentelor (fructe și legume) provoacă deteriorarea acestora, reducând astfel aprovizionarea cu alimente și rezultând creșteri majore ale prețurilor. Fructele și legumele trebuie conservate pentru a-și prelungi durata de valabilitate, menținând în același timp calitatea lor pe o perioadă mai lungă de timp. Numeroase tehnologii de procesare la scară largă, cum ar fi uscarea, congelarea, conservarea și deshidratarea, sunt adoptate pe scară largă în diferite țări [1].

Deshidratarea forțată este un proces energointensiv, ceea ce a făcut ca în multe țări, inclusiv în România, acest procedeu să se utilizeze tot mai puțin, fiind chiar pe punctul de dispariție. Față de această situație, cercetătorii din țările avansate au găsit soluții noi de echipamente tehnice pentru deshidratarea legumelor și fructelor, cu randamente superioare și cu asigurarea la produsele finite a unor proprietăți alimentare și senzoriale tot mai înalte.

O direcție importantă abordată în cercetările privind conservarea prin deshidratare a legumelor și fructelor se referă la utilizarea în acest proces a energiei solare sau a celei obținută din alte surse regenerabile. Se poate dovedi că prin utilizarea unor echipamente relativ simple se poate conduce procesul de deshidratare astfel încât produsele finale să fie de cea mai bună calitate, iar costurile conservării să fie cât mai reduse.

Energia solară este o sursă de energie regenerabilă și curată care valorifică lumina soarelui pentru a genera electricitate sau căldură. Folosind panouri solare din semiconductori, fotonii din lumina soarelui sunt absorbiți, eliberând electroni și creând un curent electric. Această energie este prietenoasă cu mediul, deoarece nu produce emisii nocive și nu epuizează resursele finite. Energia solară poate fi implementată la diferite scări, oferind independență energetică și rezistență, în special în zonele îndepărtate. Deși costurile inițiale pot fi mari, progresele în tehnologiile de stocare îmbunătățesc eficiența și depășesc limitările asociate condițiilor meteorologice. În general, energia solară oferă o soluție durabilă pentru nevoile noastre energetice, contribuind la un viitor mai curat și mai durabil

1.2. Energia solară în România

(Sursa: <https://gov.ro/ro/energia-solara>)

România dispune de cel mai mare potențial solar din regiunea de sud-est a Europei. Se situează în zona B europeană în ceea ce privește însorirea, cu aproximativ 210 zile însorite pe an.

Prin PNIESC aprobat – versiunea 2021, România a stabilit o pondere a energiei regenerabile în consumul total de energie de 30,7%. Aceasta se modifică, însă, ținând cont de noile obiective propuse de Comisia Europeană, respectiv creșterea ponderii energiei regenerabile în consumul brut de energie la 45%, la nivel UE. Astfel, prin proiectul de revizuire a PNIESC, România va crește la 38,3% ponderea energiei din surse regenerabile în consumul final brut de energie pentru anul 2030.

În ultimul deceniu, promovarea utilizării energiei din surse regenerabile și în special producerea energiei solare a reprezentat un real interes la nivel național atât pentru producătorii a căror activitate comercială reprezintă producerea și vânzarea de energie din surse regenerabile, cât și pentru sectorul casnic, pentru acoperirea consumului propriu.

Pentru a susține energia solară, România a prevăzut o serie de programe de finanțare din fonduri europene și din bugetul de stat. PNRR prevede investiții în noi capacități de producție de 950 MW de energie electrică din surse regenerabile (solară și eoliană onshore).

Reforma 1 a PNRR (Reforma pieței energiei electrice, înlocuirea cărbunelui în mixul energetic și sprijinirea unui cadru legislativ și de reglementare pentru investițiile private în producția de energie electrică regenerabilă) prevede introducerea Contractelor pentru diferență (CfD) ca principal instrument de încurajare a investițiilor în noi capacități de generare a energiei bazate pe tehnologii curate. În 2022, România a aderat la Alianța Solară Internațională (ISA). România se alătură altor 122 de state membre ale ISA, asumându-și rolul de promotor al energiei solare la nivel mondial și regional. România va beneficia de expertiza internațională și de resurse financiare pentru a accelera implementarea sistemelor de energie solară și a altor tehnologii inovatoare.

1.3 Energia solară soluția de decarbonizare.

(sursa: [2024Energy decarbonisationHomepageNewsroomIn Brief](#))

Energia solară este esențială pentru atingerea obiectivelor de decarbonizare ale României și pentru contribuția la traiectoria privind neutralitatea climatică a Uniunii Europene (UE) până în anul 2050. Inițiativa REPowerEU a stabilit obiective ambițioase, vizând peste 320 GW capacitate instalată de energie solară (PV) până în 2025 și aproximativ 600 GW până în 2030. Printre motivele prioritizării energiei solare se numără rentabilitatea acesteia, ușurința cu care poate fi instalată și creșterea finanțării alocate din surse publice. Documentele strategice ale UE, precum Strategia privind energia solară, revizuirea Directivei privind energia din surse regenerabile (RED III) și Planul Industrial al Pactului Verde subliniază rolul esențial al energiei solare în atingerea obiectivelor europene.

În anul 2022, capacitatea instalată de energie solară din România era de 1,8 GW, ceea ce reflectă o creștere modestă în ultimii ani, comparativ cu țări din regiune precum Ungaria (4,2 GW) și Polonia (12,2 GW). Dezvoltarea energiei solare în România a fost constrânsă de mai mulți factori, precum lipsa predictibilității legislației, întârzierile privind conectările la rețele și procesele birocratice. Aceste provocări au încetinit ritmul de expansiune, majoritatea capacității instalate fiind realizată între 2010 și 2016, pe fondul schemei de sprijin prin certificate verzi.

Recent, în contextul unor ținte europene mai ambițioase privind decarbonizarea, România a recunoscut importanța energiei eoliene și a făcut pași importanți pentru a sprijini dezvoltarea acesteia. Cea mai recentă variantă a Strategiei Energetice a României arată angajamentul privind extinderea capacității instalate în energie solară, vizând 8,2 GW până în 2030, 21,1 GW până în 2040 și 33,3 GW până în 2050.

Printre inițiativele importante se numără schema Contractelor pentru diferență (CfD), dezvoltată cu scopul de a sprijini proiectele solare și eoliene onshore. Schema a fost publicată în anul 2024 și are o valoare de 3 miliarde de euro, finanțată din Fondul de Modernizare (FM) până în 2030. Aceasta vizează instalarea a 5 GW de capacități noi prin intermediul a două licitații: 1,5 GW în 2024 și 3,5 GW în 2025.

În plus, România alocă 2 miliarde de euro pentru sprijinirea dezvoltării energiei solare, în perioada următoare, principalele surse de finanțare fiind FM, Planul Național de Redresare și Reziliență (PNRR), Fondul pentru o Tranziție

Justă (FTJ) și schemele finanțate de Agenția Fondului pentru Mediu (AFM). Această sumă este distribuită astfel: 430 de milioane de euro pentru dezvoltarea de centrale electrice fotovoltaice (la scară utilitară), 1,4 miliarde de euro pentru centrale electrice fotovoltaice pe acoperișuri și 104 milioane de euro pentru capacități de fabricare.

Capacitatea instalată a prosumatorilor din România a atins aproximativ 1,4 GW la sfârșitul anului 2022 și se estimează că va depăși 2 GW până la finalul anului 2024. Numărul prosumatorilor a crescut de la aproximativ 40.000 în 2022 la peste 110.000 până la sfârșitul anului 2023. Această creștere a fost determinată de efectele crizei energetice și de majorarea finanțării din surse publice destinate prosumatorilor.

Pentru referință, acest document estimează un necesar de capacitate instalată de 1,23 GW în centrale electrice fotovoltaice pentru a acoperi consumul de energie electrică al gospodăriilor din Municipiul București, pentru un consum de 1,5 TWh în anul 2023. Totuși, având în vedere natura intermitentă a producției de energie solară, integrarea unor soluții eficiente de stocare devine tot mai importantă. Astfel, estimăm că va fi necesară o capacitate de stocare de 2.911 MWh, echivalentă cu cea a bateriilor pentru 50.600 de vehicule electrice Tesla Model Y. În plus, pentru a optimiza consumul de energie electrică pe tot parcursul anului, tehnologiile alternative de stocare, precum stocarea sezonieră a hidrogenului regenerabil, ar trebui luate în considerare pe termen mediu și lung.

În ciuda progreselor recente, rămân o serie de provocări în ceea ce privește creșterea capacității de energie solară în România. Cele mai importante dintre acestea sunt constrângerile legate de capacitatea rețelei și dezechilibrele cu care se confruntă prosumatorii, lipsa predictibilității calendarului de implementare a fondurilor UE și întârzierile în transpunerea legislației UE.

Capitolul 2 – Stadiul actual al cercetării

(Sursa :[Uscătoare solare: perspective tehnice și tendințe bibliometrice în tehnologiile energetice](#))

2.1 Revizuirea literaturii de specialitate

2.1.1 Documente publicate pe an și domenii de cunoștințe conexe

Figura 2 prezintă evoluția numărului de lucrări publicate legate de tema de cercetare din 1984 până în 2024; În această perioadă, în total au fost publicate 125 de lucrări conexe. În primele decenii se observă o creștere lentă și constantă, cu o creștere semnificativă începând cu 2010, indicând un interes tot mai mare pentru

acest subiect. Această creștere este deosebit de pronunțată în ultimii ani, atingând un vârf în 2023 cu 21 de lucrări, sugerând că uscarea alimentelor și dispozitivele utilizate în acest scop au câștigat o mai mare relevanță și atenție în comunitatea științifică recentă și pot fi asociate cu strategii de atingere a obiectivelor globale ale Agendei 2030 pentru Dezvoltare Durabilă.

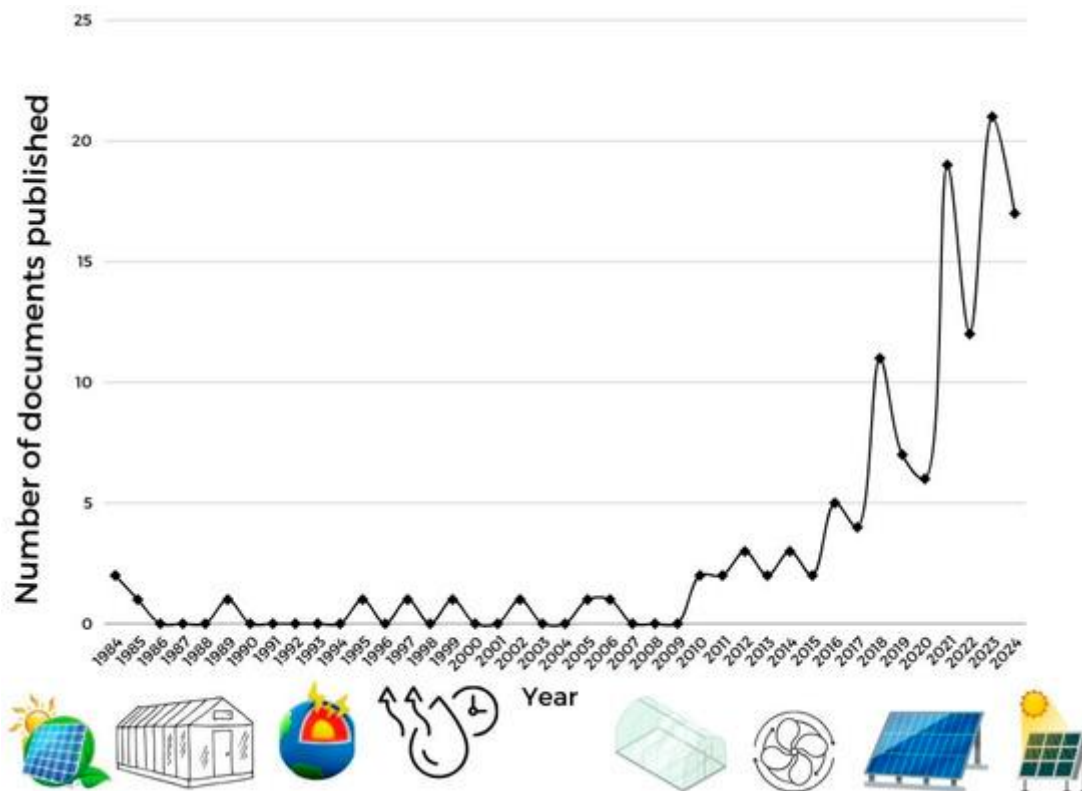


Figura 1. Documente publicate pe an, în perioada analizată (1984–2024).

Figura 3 arată, de asemenea, că cel mai mare număr de publicații este concentrat în domeniile energiei (63), ingineriei (48) și ingineriei chimice (28), ceea ce reflectă un accent predominant pe cercetarea tehnologică și energetică, posibil legată de dezvoltarea și optimizarea uscătoarelor. Științele agricole și biologice (20) și științele mediului (18) au, de asemenea, o prezență semnificativă, subliniind importanța durabilității și a producției agricole, unde uscătoarele pot juca un rol crucial în conservarea produselor agricole. Discipline precum știința materialelor, fizica, informatica, matematica și chimia, deși cu mai puține publicații, completează și sprijină cercetarea în principalele domenii, în timp ce științele sociale și decizionale, cu și mai puține publicații, ar putea fi legate de analiza impactului social și economic al acestor tehnologii în sectorul agroalimentar.

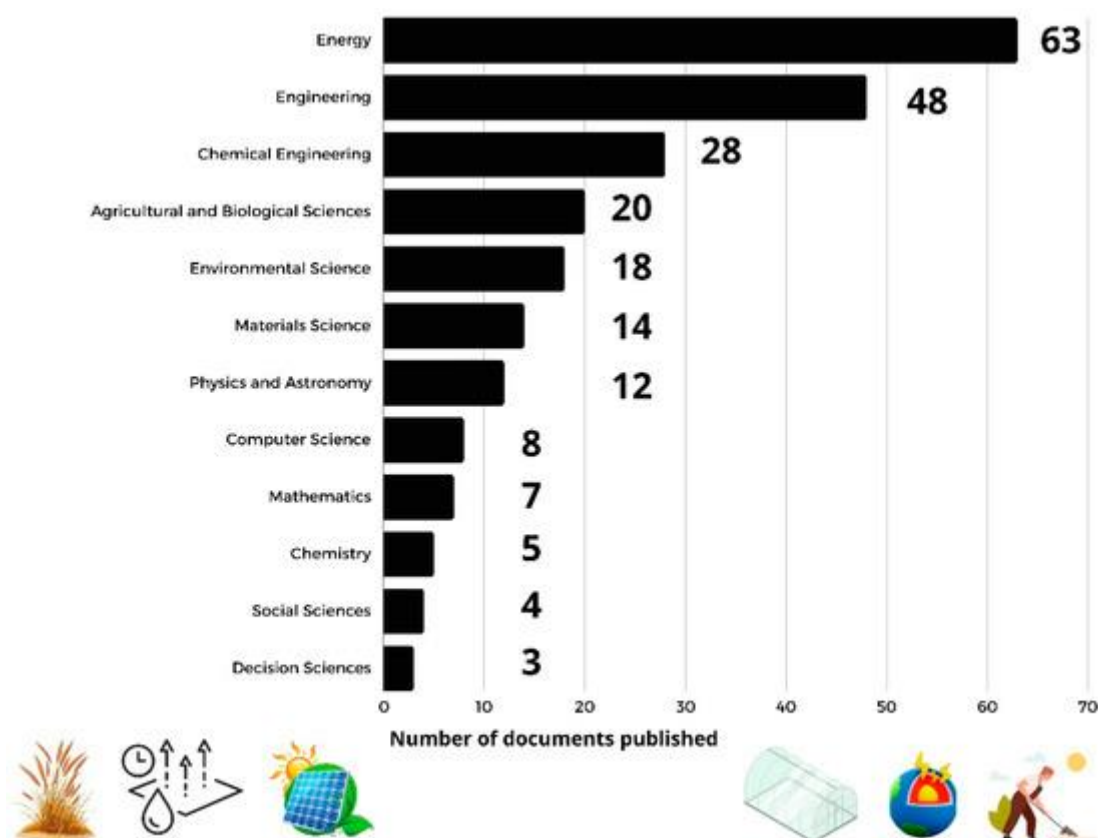


Figura 2. Domenii de cunoștințe implicate în documentele colectate.

2.1.2 Cele mai relevante tipuri și surse de publicare

Multe lucrări publicate sunt articole științifice (74), ceea ce indică faptul că principalul mijloc de diseminare a cunoștințelor în acest context este prin articole evaluate de colegi. Acest lucru sugerează un accent puternic pe cercetarea originală și contribuția noilor cunoștințe la acest domeniu de cunoaștere. Pe de altă parte, capitolele de carte reprezintă un număr mai mic (6), ceea ce poate indica faptul că se pune mai puțin accent pe sinteza cunoștințelor în format de carte sau contribuțiile în acest format sunt destinate unor publicuri mai specializate. În cazul lucrărilor de conferință (25), acestea sunt, de asemenea, un mijloc important de diseminare a rezultatelor cercetării, în special în domenii cu dezvoltare rapidă sau în stadiile incipiente ale cercetării. În cele din urmă, articolele de recenzie (21) constituie o parte considerabilă a publicațiilor, reflectând un interes pentru consolidarea și sinteza cunoștințelor existente în domeniu. Revizuirile sunt esențiale pentru a oferi o imagine de ansamblu a stadiului actual al tehnologiei, pentru a identifica tendințele, lacunele de cercetare și pentru a ghida studiile viitoare.

Primele 10 surse de publicare au fost publicate în reviste de impact ridicat (Q1), cum ar fi Solar Energy, Renewable Energy și Renewable And Sustainable

Energy Reviews. Aceste publicații se remarcă nu numai prin indicele lor ridicat H, care indică un număr mare de citări și, prin urmare, o influență ridicată în domeniu, ci și prin clasarea lor în cuartila superioară (Q1), ceea ce subliniază reputația și relevanța lor în comunitatea științifică. Cercetările publicate în aceste reviste stimulează inovația și cunoștințele în domenii critice precum energia solară, stocarea energiei și sustenabilitatea și sunt esențiale pentru avansarea tehnologiilor regenerabile care joacă un rol cheie în tranziția energetică globală. În special, Journal Of Energy Storage se concentrează pe toate aspectele stocării energiei, inclusiv modelarea, noile tehnologii și strategiile de management. Aceste aspecte sunt deosebit de relevante pentru optimizarea uscătoarelor solare, deoarece eficiența acestor dispozitive poate fi îmbunătățită semnificativ cu soluții avansate de stocare a energiei, permițând o utilizare mai eficientă a energiei solare captate. Cercetarea în acest domeniu este esențială pentru dezvoltarea unor tehnologii de uscare solară mai eficiente și mai durabile la nivel global.

Pe lângă aceste reviste de mare impact, există o participare considerabilă la publicații cu cuartila inferioară, cum ar fi Journal Of Food Process Engineering (Q2) și Green Energy And Technology (Q3), precum și în Lecture Notes In Mechanical Engineering (Q4). Deși aceste publicații au un impact mai mic în ceea ce privește citările și relevanța generală, ele sunt cruciale pentru diseminarea unor cercetări mai specializate sau aplicate. De exemplu, Journal Of Food Process Engineering este relevant în nișa de inginerie alimentară, unde sunt explorate tehnici și tehnologii specifice care pot avea un impact direct asupra industriei alimentare. În mod similar, notele de curs despre energie și tehnologie verde în inginerie mecanică servesc drept platforme pentru prezentarea mai multor cercetări tehnice sau preliminare, care pot fi fundamentale pentru dezvoltarea continuă în domeniile lor respective.

În cele din urmă, includerea lucrărilor conferințelor, cum ar fi lucrările conferinței AIP, evidențiază importanța diseminării ideilor și constatărilor preliminare în forurile academice. Deși aceste proceduri nu sunt clasificate în SJR și au de obicei un impact mai mic în ceea ce privește citările, ele joacă un rol crucial în introducerea de noi concepte și facilitarea discuțiilor între cercetători înainte ca rezultatele să fie publicate în reviste mai consacrate.

2.1.3 Cele mai utilizate cuvinte cheie

În primele 50 de cuvinte cheie utilizate de autori, "uscare" (81 de mențiuni) și "uscătoare solare" (79 de mențiuni) sunt cei mai proeminenți termeni, subliniind importanța centrală a acestor procese în domeniul de studiu. Acest lucru sugerează că cercetarea s-a concentrat semnificativ pe optimizarea și dezvoltarea

tehnologiilor de uscare solară, care sunt esențiale pentru îmbunătățirea eficienței energetice și a durabilității în agricultură.

În plus, alți termeni precum "stocarea căldurii" (49 de mențiuni), "produse agricole" (46 de mențiuni) și "energie solară" (44 de mențiuni) apar, de asemenea, frecvent, indicând că stocarea căldurii și aplicarea energiei solare în uscarea produselor agricole sunt domenii de mare interes. Subiecte precum "energia termică" (29 de mențiuni), "materialele cu schimbare de fază" (28 de mențiuni) și "stocarea energiei" (23 de mențiuni) reflectă un accent pe inovația tehnologică pentru a îmbunătăți eficiența energetică, evidențiind rolul materialelor cu schimbare de fază în stocarea termică. În plus, cuvântul cloud evidențiază, de asemenea, relevanța unor concepte precum "eficiență energetică" (22 de mențiuni) și "dinamică computațională a fluidelor" (19 mențiuni), indicând un interes pentru optimizarea proceselor energetice și îmbunătățirea eficienței uscătoarelor solare și a tehnologiilor implicate utilizate.

2.1.4 Cei mai relevanți autori

Lucrările au fost generate de 339 de autori în total; primii 5 autori sunt cercetători de frunte în acest domeniu de cunoaștere, cu un impact puternic măsurat prin numărul de lucrări publicate, citări și indicele H. Lista este condusă de Chandramohan, V.P., cu o producție științifică de 5 lucrări și un total de 3621 de citări. Următorul în listă este Muthukuma, P., care iese în evidență cu cel mai mare număr de citări totale (7465) și cel mai mare indice H (53), indicând influența remarcabilă a cercetării sale. Cei mai mulți dintre acești autori sunt afiliați la instituții prestigioase din India, cum ar fi Institutul Național de Tehnologie Waranga și Universitatea Tehnologică din Delhi, subliniind proeminența Indiei în cercetarea tehnologică și științifică.

Pe de altă parte, Janjai, S. de la Universitatea Silpakorn din Thailanda este singurul autor din afara Indiei, dar are un impact comparabil cu ceilalți autori, cu 6470 de citări și un H-index de 41 și o contribuție de 3 lucrări în acest domeniu de cercetare. Acest grup de autori demonstrează relevanța internațională a cercetării lor, în special în domeniile ingineriei și tehnologiei aplicate. Indicele H ridicat, variind de la 32 la 53, reflectă profunzimea și amploarea contribuțiilor lor științifice, consolidându-i ca lideri în uscarea produselor alimentare din disciplinele lor respective.

Producția academică a acestor autori în ceea ce privește numărul de articole publicate și rata anuală de citare (CT pe an) de-a lungul timpului este prezentată în Figura 5. Se observă că autorii Muthukumar, P. și Chandramohan, V.P. au o activitate mai mare în ceea ce privește numărul de articole și citări în comparație

cu alți autori precum Bala, B.K., Janjai, S. și Kumar, A., care au un număr mai mic de publicații și citări. Muthukumar, P. pare să fi avut un impact semnificativ, cu mai multe articole care au rămas citate în mod constant de-a lungul timpului, mai ales în ultimii ani. Pe de altă parte, activitatea unor autori precum Bala, B.K. și Janjai, S. este concentrată în perioade mai specifice, cu mai puține publicații, sugerând o contribuție mai oportună în timp. Distribuția citărilor indică, de asemenea, că articolele mai recente tind să primească mai multă atenție, ceea ce ar putea fi legat de relevanța subiectelor abordate sau de un interes recent mai mare în domeniile lor de studiu.

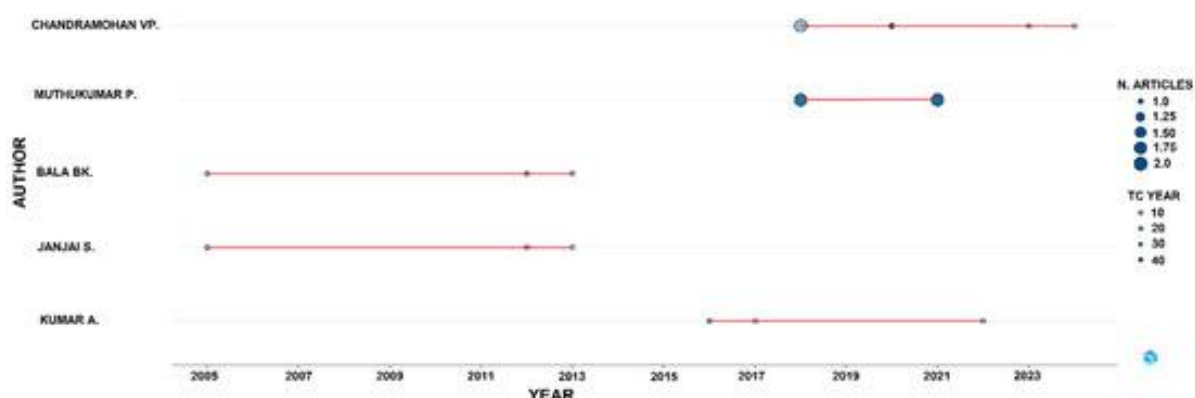


Figura 3. Producția anuală de articole de către primii 5 autori.

În cele din urmă, în ceea ce privește co-autorul, Kumar, A., care apare ca un nod central cheie, cu 12 legături și o forță de legătură de 15, indicând rolul său crucial în conectarea diferitelor comunități de cercetare (Figura 6). Kumar, A., acționează ca o punte între două grupuri mari de autori, facilitând colaborarea dintre comunitatea lui Prakash, O. și Ahmad, A. în stânga, și grupul lui Kant, K. și Gori, S. în dreapta. Această poziție centrală nu numai că evidențiază rețeaua extinsă de colaborări a lui Kumar, A., dar subliniază și importanța sa în schimbul de cunoștințe și avansarea cercetării în domeniul său, reflectată în puterea ridicată de legătură pe care o menține între aceste grupuri diferite de coautori.

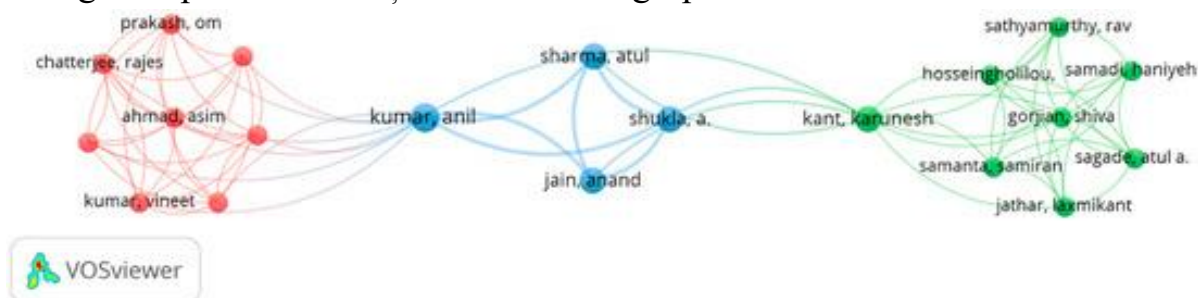


Figura 4. Rețeaua principală de co-autori după autor.

2.1.5 Producția științifică pe țări

În total, lucrările publicate au fost generate de autori din 47 de țări (Figura 7). India iese în evidență cu 61 de lucrări, indicând o producție științifică ridicată în comparație cu celelalte. Alte țări, cum ar fi China, Statele Unite și Canada, au considerabil mai puține lucrări, dar sunt încă vizibile cu 4 până la 6 lucrări fiecare. Majoritatea țărilor din America de Sud, Africa și părți ale Asiei au mai puțin de 5 lucrări, reflectând o producție științifică mai mică în aceste regiuni.



Figura 5. Producția științifică pe țări.

În general, harta arată o concentrație semnificativă a activității științifice în India, cu o dispersie mai mică a lucrărilor în alte regiuni. Acest lucru sugerează că cercetarea în domeniul specific de studiu este dominată de câteva națiuni, în timp ce multe altele contribuie într-o măsură mai mică. Distribuția inegală poate indica diferențe în ceea ce privește concentrarea cercetării, disponibilitatea resurselor sau prioritățile academice în diferite regiuni ale lumii. Acest tip de vizualizare este util pentru identificarea modelelor geografice în producția științifică și poate ajuta la direcționarea viitoarelor eforturi de colaborare către domenii în care este necesară dezvoltarea științifică.

Rețeaua de co-autori a acestor țări este prezentată în Figura 8, unde India apare ca cel mai proeminent nod din rețea, indicând poziția sa centrală și participarea sa ridicată la colaborări internaționale. Cu 15 legături și o forță de legătură de 19, India nu numai că produce un volum mare de lucrări științifice, dar colaborează frecvent și cu alte țări, cum ar fi Thailanda, Canada și Coreea de Sud. Legăturile dintre aceste țări și poziția centrală a Indiei sugerează că este un jucător cheie în rețeaua de co-autori, facilitând cooperarea între diferite regiuni ale lumii.

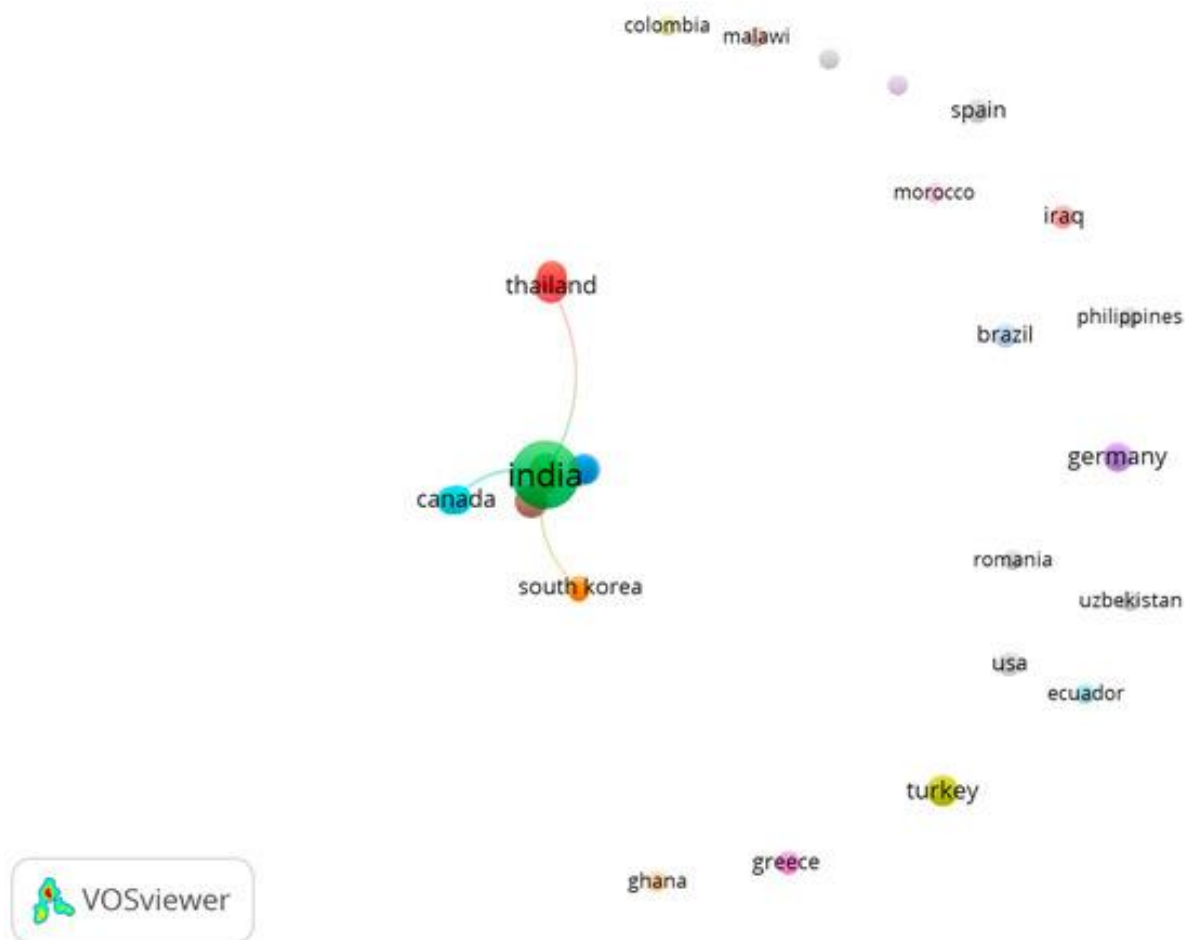


Figura 6. Rețeaua de co-autori pe țări.

În schimb, alte țări precum Germania, Brazilia, Turcia și Spania par mai dispersate și mai puțin conectate în rețea, ceea ce ar putea indica o frecvență mai mică a colaborării internaționale sau o concentrare pe colaborări cu un număr limitat de țări. Dispersia nodurilor precum Malawi, Columbia și Grecia, printre altele, fără conexiuni vizibile sugerează o participare scăzută a acestor țări la colaborări internaționale în cadrul acestei rețele specifice sau că sunt implicate în colaborări bilaterale sau regionale mai limitate și nu foarte bine identificate. În general, această vizualizare evidențiază diferențele de conectivitate și domeniul de aplicare global al colaborării științifice între țările reprezentate pentru lucrări pe teme legate de uscătoarele solare pentru produse alimentare.

2.1.6 Cele mai citate documente

Cele 126 de lucrări publicate până în prezent au obținut un total de 3050 de citări în total, ceea ce înseamnă o valoare medie de citare per lucrare de 24,2 citări. Tabelul 1 enumeră cele mai citate 10 articole din acest domeniu de cunoaștere.

Primul articol cu 209 citate a lucrat la dezvoltarea unui uscător solar eficient și rentabil care încorporează un sistem de stocare a energiei termice. Această abordare permite uscarea continuă a produselor alimentare agricole la temperaturi moderate (40-75 °C), făcându-l o alternativă viabilă la combustibilii fosili în țările în curs de dezvoltare. Stocarea energiei solare este esențială pentru reducerea decalajului dintre cererea și oferta de energie, în beneficiul populațiilor rurale și urbane care se bazează în principal pe combustibili necomerciali. În ciuda unor bariere inițiale, cercetările au demonstrat eficacitatea uscării solare, iar acest articol trece în revistă mai multe tehnologii de stocare termică aplicate uscării alimentelor agricole.

Al doilea articol cu 203 citate se concentrează pe tehnici avansate de procesare pentru a reduce pierderile post-recoltare ale produselor agricole, cu accent pe uscarea solară. În special, tipul indirect de uscător solar (ITSD) este evidențiat pentru eficacitatea sa în conservarea alimentelor, deși performanța și caracteristicile sale unice nu au fost investigate în detaliu până atunci. Această lucrare trece în revistă clasificarea uscătoarelor solare și îmbunătățirea transferului de căldură în ITSD, subliniind importanța parametrilor precum temperatura, viteza aerului și radiația solară în procesul de uscare și evidențiind că uscătoarele pasive sunt mai ușor de fabricat decât cele active.

A treia lucrare cu 187 de citări studiază performanța unui uscător solar cu convecție forțată în mod mixt, integrat cu stocarea energiei termice pe bază de ceară de kerosen, pentru uscarea turmericului negru. Comparând uscarea în uscătorul solar cu uscarea la soare, rezultatele au arătat că prima este semnificativ mai eficientă, reducând timpul de uscare de la 46,5 ore la 18,5 ore. În plus, au fost montate modele cinetice de uscare, constatând că modelele cu doi termeni și Page au fost cele mai potrivite pentru a prezice cinetica de uscare. Eficiența încălzitorului solar de aer și a uscătorului solar a fost de 25,6% și, respectiv, 12,0%, evidențiind eficacitatea sistemului.

2.1.7 Top 10 cele mai citate articole

Tabelul 1

Titlu	Doi	Citate	Referință
Uscător solar cu sisteme de stocare a energiei termice pentru uscarea produselor alimentare agricole: o recenzie.	10.1016/j.rser.2010.04.014	209	[47]
O recenzie asupra uscătoarelor solare de tip indirect pentru culturile agricole - Configurarea uscătorului, performanța acestuia, stocarea energiei și puncte importante importante.	10.1016/j.apenergy.2019.114005	203	[48]
Cinetica de uscare și analiza calitatii turmericului negru (<i>Curcuma caesia</i>) uscare într-un uscător solar cu convecție forțată în mod mixt integrat cu stocarea energiei termice.	10.1016/j.renene.2017.12.053	187	[49]
Sisteme de uscare solară bazate pe stocarea energiei termice: o recenzie.	10.1016/j.ifset.2016.01.007	156	[50]
Studiul și modelarea performanței energetice a unui colector solar hibrid fotovoltaic/termic: Configurație potrivită pentru un uscător solar indirect.	10.1016/j.enconman.2016.03.059	107	[51]
Revizuirea uscătoarelor solare cu sisteme de stocare a căldurii latente pentru produse agricole.	10.1016/j.rser.2010.09.006	95	[52]
Evaluarea performanței unui uscător solar Blackbody.	10.1186/s13705-015-0052-x	93	[53]
Utilizarea stocării de căldură latentă pentru a conserva energia în timpul uscării și efectul acesteia asupra cineticii de uscare a unui produs alimentar.	10.1016/j.applthermaleng.2005.11.007	91	[54]
Predicția experimentală și a rețelei neuronale a performanței unui uscător de tunel solar pentru uscarea bulbilor de jackfruit și a pielii	10.1111/j.1745-4530.2005.00042.x	70	[55]
Tehnologie de uscare solară	10.1007/s12393-011-9044-6	70	[56]

Al patrulea articol, cu 156 de citate, trece în revistă progresele în uscătoarele solare care utilizează materiale de stocare a energiei termice. Aceste uscătoare, care funcționează la temperaturi cuprinse între 40 °C și 60 °C, s-au dovedit a fi o alternativă viabilă la uscătoarele pe bază de combustibili fosili. Capacitatea de a stoca energie în timpul zilei și de a o elibera noaptea sau în perioadele de insolație scăzută este crucială pentru a reduce decalajul dintre cererea și oferta de energie. Această lucrare evidențiază contribuții importante în domeniu și evidențiază actualizările recente ale tehnologiei de stocare a energiei termice, concentrându-se pe materialele capabile să stocheze căldură sensibilă și latentă.

Al cincilea articol, cu 107 citate, analizează o configurație hibridă a colectoarelor solare fotovoltaice-termice care poate fi integrată în sistemele de uscare solară indirectă. Acest studiu evidențiază eficiența energetică a configurației, cu valori de eficiență electrică, termică și generală ajungând la 10,5%, 70% și, respectiv, 90%. Articolul evidențiază potențialul colectoarelor hibride de a îmbunătăți eficiența de uscare solară și de a oferi temperaturi mai adecvate pentru uscarea produselor agricole, precum și importanța anumitor parametri și condiții de funcționare asupra performanței collectorului.

Ultimele patru articole cu cele mai puține citate contribuie, de asemenea, în mod semnificativ la cunoașterea în domeniul uscării solare. Ei trec în revistă totul, de la tehnici tradiționale la abordări inovatoare, cum ar fi utilizarea materialelor cu schimbare de fază (PCM) pentru stocarea energiei solare. Aceste studii evidențiază importanța îmbunătățirii tehnologiei de uscare solară pentru a reduce risipa de alimente și pentru a asigura disponibilitatea alimentelor pe tot parcursul anului, în special în zonele tropicale și subtropicale. Implementarea acestor sisteme poate avea un impact semnificativ asupra conservării alimentelor și securității alimentare globale.

2.1.8 Rețeaua de co-apariție a cuvintelor cheie

Rețeaua de co-apariții dezvăluie o imagine largă și bine structurată a cercetării privind uscarea, stocarea energiei termice și aplicațiile sale (Figura 9). Fiecare cluster reprezintă un domeniu tematic specific, cu interconexiuni semnificative între subiecte care indică natura multidisciplinară a domeniului. Pentru o analiză mai aprofundată a celor cinci cluster identificate, putem detalia fiecare cluster și temele sale principale și putem extinde discuția după cum urmează.

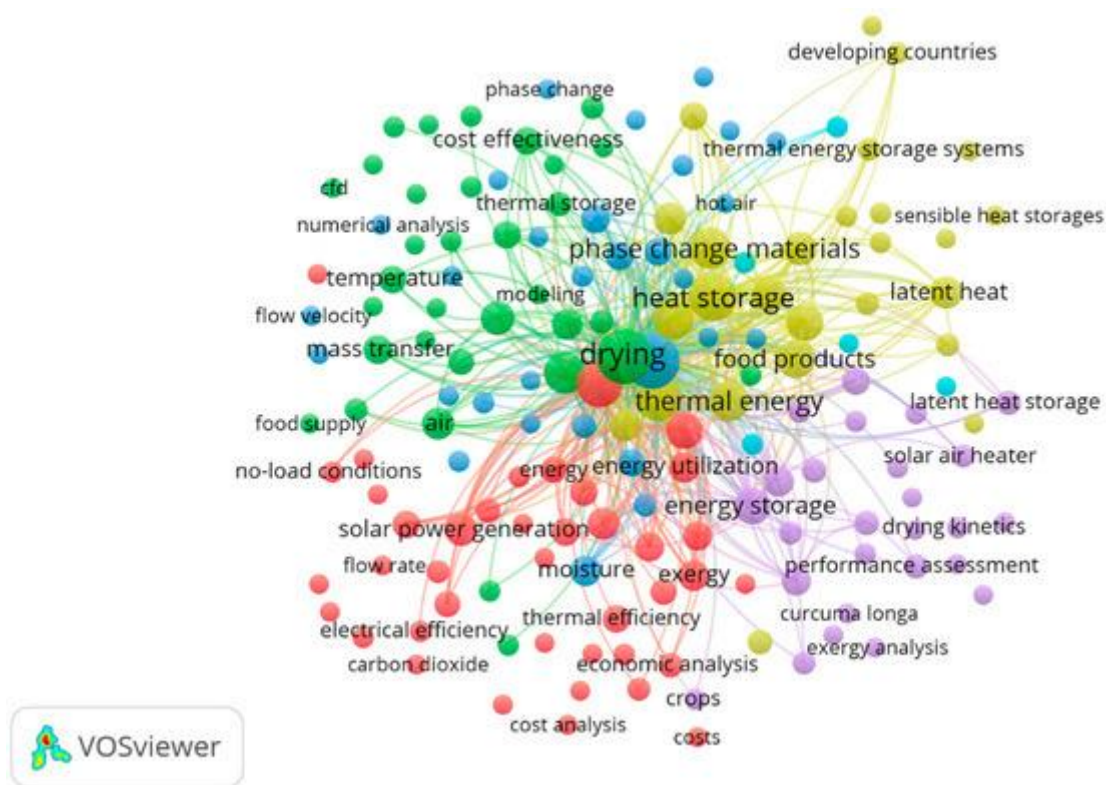


Figura 7. Harta co-aparițiilor cuvintelor cheie.

Clusterul 1 – Roșu (generarea de energie și eficiență termică): În acest cluster, sunt evidențiate cuvinte cheie precum "Generarea de energie solară", "Eficiență electrică", "Dioxid de carbon", "Exergie", "Debit" și "Analiză economică". "Eficiență electrică", "Dioxid de carbon", "Exergie", "Debit" și "Analiză economică". Acest cluster dezvoltă cercetări axate pe îmbunătățirea sistemelor de uscare agricolă, abordând probleme precum costurile ridicate ale energiei și calitatea produselor uscate. Obiectivul principal este de a crea uscătoare solare durabile care să reducă utilizarea combustibililor fosili și a CO₂ Emisiilor. Un exemplu al acestor inovații este dezvoltarea unui sistem de uscare prin infraroșu-convecție cu colector fotovoltaico-termic, care a atins o eficiență termică medie de 43,75% și o eficiență electrică de 13,49%, cu o eficiență energetică globală de 15,03%. În plus, acest sistem a evitat emisiile de 1,98 kg h⁻¹ de CO₂ în atmosferă.

De asemenea, au fost efectuate studii aplicate asupra uscării mărului (*Dillenia indica*) într-un uscător solar cu convecție forțată modificat (MFCSD), care a arătat o îmbunătățire cu 12% a eficienței termice în comparație cu uscătoarele convenționale din sticlă și un conținut mai mare de carbohidrați de 47,85% și conținut de proteine de 21,24% în probele uscate. Perioada de amortizare a MFCSD a fost estimată la 2,56 ani, mult mai scurtă decât durata sa de viață utilă de 20 de ani. Cercetarea include, de asemenea, analize energetice, exergiene și

economie de mediu pentru diferite debite masice de aer de uscare, obținând îmbunătățiri semnificative ale calității produsului și timpi de uscare reduși în comparație cu metodele tradiționale. Uscătoarele solare fotovoltaice-termice hibride nu numai că obțin eficiențe energetice ridicate, dar oferă și o bună atenuare a dioxidului de carbon, adaptându-se la nevoile zonelor rurale cu o disponibilitate mai mare de produse agricole pentru uscare.

Clusterul 2 - Verde (Modelarea transferului de căldură și a uscării): Cuvinte cheie precum "Transfer de masă", "Temperatură", "Aer", "Viteza curgerii", "Modelare" sunt evidențiate. Acest cluster grupează subiecte legate de aspectele fizice ale uscării și transferului de căldură. În acest cluster, sunt dezvoltate mai multe sisteme inovatoare de uscare solară care abordează provocările uscării produselor agricole, cum ar fi cunoașterea modului în care funcționează uscătoarele în sine. Dintre soluțiile studiate, uscătorul hibrid solar-biomasă (HSBD) se remarcă prin capacitatea sa de a usca până la 300 kg de produse în 16 ore, comparativ cu cele 29 de ore necesare pentru uscarea la soare. Cu o temperatură medie de uscare de 14,8 °C mai mare decât aerul înconjurător și un consum de biomasă de 2 kg h⁻¹, acest sistem protejează produsele de ploaie, insecte și praf, îmbunătățind calitatea acestora și reducând dependența de surse de energie neregenerabile.

Pe de altă parte, în ceea ce privește modelarea, există uscătorul mixt integrat de seră (MMGHD), care a fost optimizat prin modelare analitică în MATLAB. Acest uscător combină un colector de aer fotovoltaico-termoelectric (PVT-TEC) cu un sistem de stocare a căldurii, care îi permite să prelungească uscarea după apusul soarelui. Acest sistem a atins o eficiență termică globală de 70,7% și o eficiență electrică crescută cu 2,61% datorită includerii unui convertor termoelectric pe spatele panoului fotovoltaic, demonstrând potențialul și eficiența ridicată în uscarea produselor agricole. În aceeași linie de cercetare și în contextul țărilor în curs de dezvoltare, cum ar fi Filipine, unde pierderile post-recoltare a orezului pot ajunge la 36%, uscătorul solar gonflabil (ISD) a devenit o alternativă eficientă. Acest uscător a fost optimizat prin modelare termică în MATLAB/Simulink; modelul analitic a arătat o acuratețe ridicată (MAPE < 10%) în prezicerea performanței de uscare. Prin urmare, modelul de predicție furnizat a devenit un instrument de calcul util pentru a fi aplicat micilor fermieri care doresc să îmbunătățească eficiența uscării în diferite condiții climatice.

Clusterul 3 – Galben (Materiale cu schimbare de fază și stocare termică): Aici, evidențiem cuvinte cheie precum "Materiale cu schimbare de fază", "Stocare a căldurii", "Energie termică", "Sisteme de stocare", "Căldură latentă", "Depozite

de căldură sensibilă", "Rentabilitate". Acest cluster dezvoltă studii aplicate privind sistemele inovatoare de uscare solară care optimizează procesul de uscare agricolă prin integrarea de soluții durabile și eficiente din punct de vedere energetic. Într-un studiu privind uscătoarele solare asistate de materiale cu schimbare de fază (PCM), s-a constatat că utilizarea PCM îmbunătățește disponibilitatea și utilizarea căldurii, reducând semnificativ timpul de uscare, în special pentru produsele sensibile la temperaturi ridicate, cum ar fi peștele, care nu pot fi expuse la temperaturi peste 62 °C. Cercetările experimentale au arătat că temperatura controlată prin implementarea PCM optimizează cinetica de uscare și îmbunătățește calitatea produsului final. Un alt studiu a analizat performanța uscătoarelor solare cu convecție forțată indirectă echipate cu PCM-uri, cum ar fi kerosenul. Aceste uscătoare, care stochează energie termică, permit uscarea continuă chiar și în absența luminii solare. S-au constatat îmbunătățiri semnificative în calitatea produsului și viteza de îndepărtare a umidității în comparație cu uscătoarele tradiționale. În plus, a fost recomandată utilizarea colectoarelor cu aripioare introduse, care au îmbunătățit eficiența energetică.

O altă linie de cercetare relevantă este evaluarea economică a alternativelor tehnologice propuse; în acest sens, analiza energetică și economică a unui uscător solar indirect (ISD) a arătat că o configurația cu PCM optimizează eficiența termică și rata de extracție a umidității, făcându-l ideal pentru industriile de uscare a alimentelor. Configurația selectată a produs, de asemenea, produse agricole de înaltă calitate în funcțiune la capacități de încărcare la nivel industrial. În cele din urmă, cercetările privind stocarea energiei termice (TES) în uscătoarele solare au evidențiat importanța dezvoltării PCM-urilor promițătoare, cum ar fi acizii grași și amestecurile binare, care au demonstrat un mare potențial de îmbunătățire a eficienței sistemelor de uscare solară, cu intervale de topire cuprinse între 40 și 60 °C. Aceste evoluții în stocarea termică ajută la neutralizarea variațiilor în disponibilitatea energiei solare, oferind o alternativă viabilă și stabilă la uscătoarele pe bază de combustibili fosili.

Clusterul 4 - Violet (aplicații de uscare a produselor alimentare): Acest cluster evidențiază cuvinte precum "Produse alimentare", "Cinetica de uscare", "Evaluarea performanței", "Încălzitor solar de aer", "Curcuma Longa" și "Analiza exergiei". Prin urmare, încă o dată, sunt evidențiate mai multe progrese în dezvoltarea și optimizarea uscătoarelor solare pentru conservarea produselor agricole și alimentare, concentrându-se pe linii tematice care urmăresc să îmbunătățească eficiența energetică, calitatea produselor și viabilitatea economică prin integrarea tehnologiilor de stocare a energiei termice și a proiectelor

inovatoare. Una dintre principalele provocări în adoptarea uscătoarelor solare de aer (SAHRR) este intermitența radiației solare, care afectează negativ performanța termică a sistemului. Un studiu recent a abordat această problemă prin încorporarea unui mediu sensibil de stocare a energiei (SES) folosind pietricele sferice cu diametrul de 20 mm. Rezultatele experimentale au arătat că SAHRR poate menține temperaturile aerului între 41 și 53 °C timp de două ore după întreruperea sursei de energie solară, crescând temperatura aerului cu 2 până la 9 °C în raport cu mediul ambiant. În plus, analiza economică a indicat că există o perioadă de recuperare a investiției de 52 de luni pentru acest uscător, sugerând o viabilitate financiară rezonabilă pentru acest echipament.

De asemenea, în activitatea acestui cluster a fost identificat un studiu axat pe un uscător solar indirect în mod activ, care utilizează un colector cu tuburi de vid de înaltă eficiență pentru a încălzi aerul și un ventilator alimentat de un modul fotovoltaic pentru a genera flux de aer forțat. Rezultatele obținute în interiorul camerei de deshidratare, care avea o capacitate de 6 până la 45 kg, pentru uscarea frunzelor de schinduf și turmeric, au arătat că s-au obținut eficiențe termice de 34,1% și, respectiv, 23,6%, comparativ cu 5,7% și 5,4% cu tehnica de uscare la soare deschis (OSD). În plus, analiza economică a arătat că costul de capital pentru uscător este scăzut, de aproximativ 660 USD și poate fi compensat de beneficiile obținute în cadrul procesului, confirmând astfel viabilitatea economică a uscătorului la scară reală.

Pe de altă parte, în proiectarea sistemelor modulare de uscare, s-a găsit o lucrare în care a fost dezvoltat un uscător solar care combină un colector de aer cu placă plată cu trei treceri cu stocare termică și o cameră de uscare. Acest design a permis un flux de aer optimizat prin mai multe etape de absorbție și stocare a căldurii, rezultând o îmbunătățire considerabilă a timpului de uscare și a eliminării umezelii din produse precum frunzele de mentă. Simplitatea și performanța termică ridicată a designului îl fac potrivit atât pentru aplicații casnice, cât și industriale. Un alt studiu a investigat utilizarea plăcilor absorbante ondulate sablate și a pietrișelor în uscătoarele solare indirecte pentru uscarea tărtăcuței amare (*Momordica Charantia*) și a maniocului tapioca (*Manihot esculenta*). Încorporarea acestor materiale a îmbunătățit eficiența termică a sistemului, atingând valori cuprinse între 39,05% și 53,12%; la fel, CO₂ Emisiile au fost reduse semnificativ, contribuind astfel la o amprentă de carbon mai mică. Acest design, numit CSBAP, a demonstrat o capacitate mai mare de absorbție și retenție a căldurii în comparație cu uscătoarele tradiționale cu plăci plate, crescând eficiența de uscare cu aproximativ 30-36%.

Clusterul 5 – Albastru (Analiză numerică și dinamică computațională a fluidelor): Pentru acest cluster, am constatat că următoarele cuvinte ies în evidență: "Analiză numerică", "CFD (dinamică computațională a fluidelor)", "Temperatură" și "Aer". Acest cluster lucrează pe teme strâns legate de simularea comportamentului microclimatic și termic al uscătoarelor și al tehnologiilor asociate. Cercetările recente s-au concentrat pe îmbunătățirea performanței uscătorului prin analiză empirică și simulare computațională a dinamicii fluidelor (CFD). Aceste studii au permis optimizarea atât a modurilor active, cât și pasive ale fenomenelor de convecție, obținând rezultate eficiente în uscarea alimentelor.

Printre lucrările relevante se numără dezvoltarea unui model numeric bidimensional pentru a analiza uscătoarele solare indirecte folosind ceară de kerosen ca material de schimbare de fază (PCM). Acest model a permis prelungirea funcționării uscătorului până la ora 22:00, profitând de energia stocată în timpul zilei. În Yamoussoukro, Coasta de Fildeș, a fost proiectat și evaluat un uscător solar indirect cu orificii de admisie a aerului, un ventilator și un sistem de recuperare a aerului cald folosind simularea CFD. Rezultatele experimentale au arătat că acest sistem a permis atingerea unor temperaturi de până la 65 °C, ideale pentru uscarea produselor agroalimentare. Cu toate acestea, recuperarea aerului cald a redus viteza aerului în dulapul de uscare, ceea ce a afectat performanța generală, deși acest lucru ar putea fi rezolvat cu un ventilator mai puternic.

Un alt studiu relevant s-a concentrat pe dezvoltarea unui uscător solar hibrid conceput pentru uscarea roșiilor, care a atins o eficiență maximă de 74,1% folosind recircularea aerului cald. Eficiența de uscare a fost de 32,89%, iar modelele CFD utilizate pentru validarea sistemului au arătat un acord ridicat cu rezultatele experimentale. Acest uscător este ușor, portabil și permite utilizarea peste noapte cu o bobină electrică, ceea ce îi crește versatilitatea în diferite condiții de funcționare și în regiuni cu umiditate ridicată. În cele din urmă, un alt studiu a investigat îmbunătățirea eficienței termice a unui uscător solar cu un colector cu placă plată folosind PCM și un sistem de recirculare a aerului. Rezultatele au arătat că eficiența termică a crescut cu 43,42%, cu o creștere suplimentară de 11,65% datorită fluxului de aer de retur. În plus, utilizarea tuburilor de cupru cu PCM a permis o distribuție mai eficientă a căldurii, îmbunătățind eficiența de uscare a produselor precum fructele Oleaster. Simulările CFD au arătat o acuratețe ridicată, cu o eroare relativă de doar 2,56%, validând eficacitatea predictivă a modelului numeric propus.

2.1.9 Harta tematică a cercetării și a tendințelor viitoare de cercetare

Harta tematică a rețelei științifice a devenit un instrument util pentru vizualizarea subiectelor cheie dintr-un domeniu de cercetare. Folosind cuvintele cheie furnizate de autori, am elaborat harta tematică care grupează aceste cuvinte și identifică subiectele relevante din zona de studiu (Figura 10). Harta este organizată în două dimensiuni: centralitate (axa x) și densitate (axa y). Centralitatea indică importanța relativă a unui anumit subiect, în timp ce densitatea reflectă nivelul de dezvoltare al aceluși subiect. Harta tematică este împărțită în patru cadrane folosind o matrice 2×2 , iar dimensiunea bulelor de pe hartă reprezintă frecvența de apariție a cuvintelor cheie.

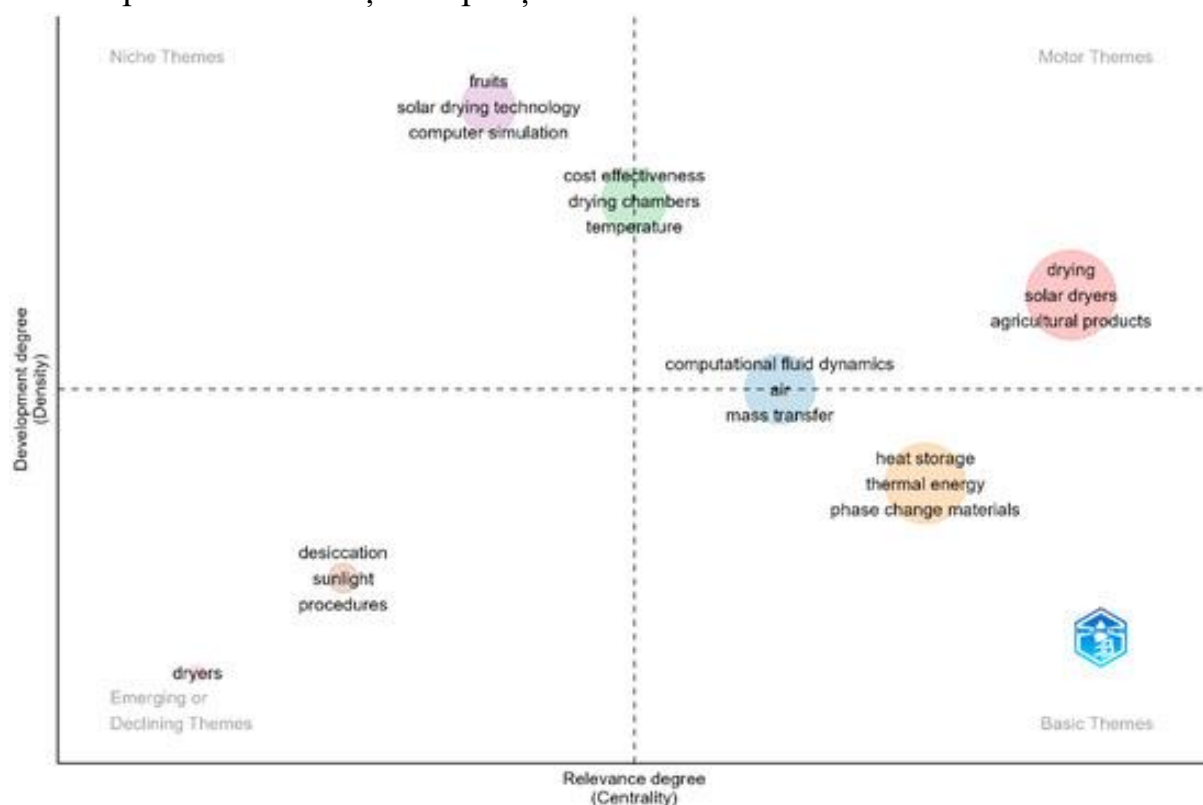


Figura 8. Reprezentarea hărții tematică a cuvintelor cheie utilizate în publicații.

În cadranul temelor de conducere, subiecte conexe, cum ar fi uscarea, uscătoarele solare și produsele agricole ocupă o poziție proeminentă. Aceste subiecte nu sunt doar foarte relevante, ci și bine dezvoltate, ceea ce indică faptul că sunt domenii cheie în care se fac progrese semnificative. Centralitatea acestor subiecte sugerează că acestea sunt esențiale pentru cercetarea actuală și stimulează inovația în tehnologia proceselor de uscare, în special în aplicațiile agricole. Uscătoarele solare, de exemplu, sunt esențiale pentru uscarea eficientă și durabilă a produselor agricole, ceea ce este vital în țările în care energia solară este abundentă și se caută soluții de uscare cu costuri reduse.

În cadranul subiectelor de nișă, subiectele asociate cu uscarea fructelor, tehnologia de uscare solară și simularea computerizată se remarcă ca nișe bine dezvoltate, dar cu relevanță mai specifică. Aceste teme indică o concentrare specializată în cercetare, unde tehnologiile și metodele sunt rafinate pentru aplicații, cum ar fi uscarea fructelor folosind simularea computerizată. Densitatea puternică a acestor subiecte reflectă dezvoltarea avansată în domenii specifice, eventual vizând optimizarea proceselor și îmbunătățirea eficienței și calității uscării produselor cu valoare adăugată ridicată, cum ar fi fructele. Cu toate acestea, centralitatea lor mai scăzută sugerează că, deși sunt subiecte importante, impactul lor este mai limitat la contexte sau aplicații specifice.

Cadranul din stânga jos prezintă subiectele deshidratării, luminii soarelui, procedurilor și uscătoarelor, care sunt subdezvoltate și de relevanță scăzută. Acest lucru ar putea sugera că sunt fie zone emergente care nu au captat încă atenția comunității științifice, fie că sunt zone în declin cu interes în scădere pentru explorarea lor. De exemplu, deshidratarea și procedurile legate de lumina soarelui ar putea reprezenta investigații inițiale sau experimentale asupra metodelor tradiționale sau a noilor abordări care nu s-au impus încă ca practică standard.

În schimb, cadranul din dreapta jos include subiecte de transfer de masă, dinamica fluidelor computaționale, stocarea căldurii, energia termică și materialele cu schimbare de fază. Acestea sunt considerate subiecte de bază esențiale pentru înțelegerea și avansarea tehnologiei de uscare. Deși au o centralitate ridicată, densitatea lor este moderată, sugerând că sunt fundații pe care se construiesc alte domenii mai avansate, cum ar fi subiectele motorii. Includerea acestor concepte de bază subliniază importanța lor în dezvoltarea sistemelor eficiente de uscare, în special în managementul energiei termice și dinamica fluidelor în timpul procesului de uscare sau integrarea acestor concepte pentru dezvoltarea modelelor deterministe sau stocastice.

A mai fost efectuată o analiză a corespondenței multiple (MCA) pentru a identifica mai multe clustere bine definite legate de energia solară și aplicarea acesteia în industria agricolă și alimentară axată pe procesul de uscare. Figura 11 reafirmă ceea ce s-a discutat anterior și arată modul în care conceptele cheie, cum ar fi energia solară fotovoltaică, încălzitoarele solare de aer, stocarea energiei termice și prelucrarea alimentelor, sunt grupate în jurul unor domenii tematice specifice, reflectând evoluția acestor tehnologii și impactul lor asupra eficienței energetice și sustenabilității uscătoarelor de alimente.

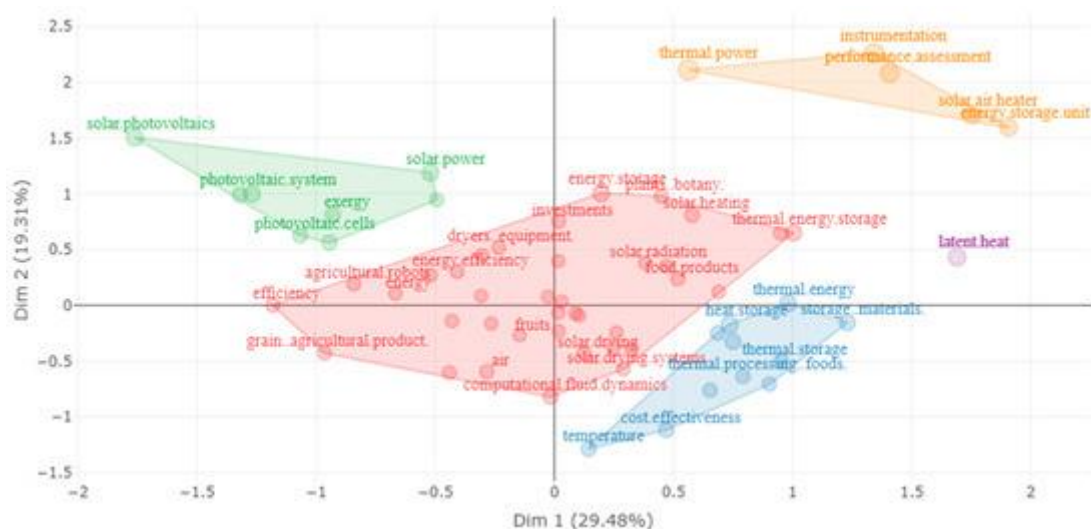


Figura 9. Analiza corespondenței multiple (MCA).

Clusterul verde legat de energia solară fotovoltaică dezvăluie o interconectare puternică între tehnologiile de generare a energiei solare și eforturile de îmbunătățire a eficienței conversiei energiei. Acest cluster sugerează că cercetările în acest domeniu s-au concentrat pe maximizarea eficienței sistemelor fotovoltaice pentru a obține mai multă energie cu pierderi mai mici, iar analiza exergică pare a fi un instrument cheie în evaluarea unor astfel de sisteme. În schimb, clusterul portocaliu, legat de încălzitoarele solare de aer și stocarea energiei termice, arată că această linie de cercetare se concentrează pe îmbunătățirea sistemelor de încălzire prin integrarea tehnologiilor de stocare pentru a îmbunătăți eficiența uscătoarelor în perioade de radiație solară scăzută.

În centrul graficului se află clusterul roșu, care evidențiază utilizarea energiei solare în procesarea alimentelor, calificând-o ca un subiect central în cercetările actuale în procesul de uscare. În plus, integrarea instrumentelor precum dinamica fluidelor computaționale (CFD) pentru modelarea și optimizarea fluxului de aer în uscătoarele solare este esențială pentru îmbunătățirea eficienței energetice în acest domeniu, precum și a echilibrului dintre consumul de energie și calitatea produselor procesate. Clusterul albastru deschis sugerează că cercetarea în acest domeniu are ca scop îmbunătățirea capacităților de stocare a căldurii și aplicarea eficientă a energiei termice în procesele de uscare sau conservare a alimentelor. În cele din urmă, clusterul violet, deși mic, evidențiază conceptul de căldură latentă, care este esențial în sistemele de stocare termică. Utilizarea căldurii latente permite captarea și eliberarea unor cantități mari de energie fără schimbări drastice de temperatură, care este o caracteristică critică în sistemele avansate de stocare termică. Acest lucru sugerează că există un interes tot mai mare pentru

tehnologiile care explorează materialele cu schimbare de fază (PCM) pentru a optimiza stocarea energiei în aplicațiile de uscare.

Conform acestui grafic, este posibil să se determine și unele tendințe de cercetare viitoare sau domenii cu potențial pentru studii viitoare, printre care merită evidențiate următoarele:

Optimizarea eficienței sistemelor fotovoltaice: Grupul verde subliniază necesitatea unor cercetări suplimentare privind eficiența sistemelor fotovoltaice și integrarea lor în aplicațiile industriale. Se așteaptă ca analiza exergică să continue să joace un rol crucial în îmbunătățirea eficienței acestor sisteme.

Îmbunătățirea stocării energiei termice: Clusterul portocaliu arată o tendință clară de cercetare a materialelor și tehnologiilor de stocare termică. Dezvoltarea de noi materiale cu schimbare de fază (PCM) cu capacitate de stocare mai mare și costuri mai mici este un domeniu promițător. Evaluarea performanței acestor sisteme în medii reale ar trebui, de asemenea, dezvoltată în continuare.

Modelarea și simularea uscării solare: Utilizarea instrumentelor precum dinamica fluidelor computaționale (CFD) s-a dovedit a fi crucială în optimizarea proceselor de uscare solară, așa cum se reflectă în clusterul roșu. Cercetările viitoare s-ar putea concentra pe îmbunătățirea modelelor CFD pentru a simula mai bine condițiile de uscare în diferite scenarii climatice și cu diverse produse agricole. Există, de asemenea, oportunități de a studia combinația CFD-ului cu inteligența artificială pentru o optimizare mai precisă.

Tehnologii hibride pentru uscarea și prelucrarea alimentelor: Există o tendință tot mai mare de integrare a tehnologiilor hibride care combină energia solară cu alte surse de energie sau sisteme de stocare. Acest lucru va permite funcționarea uscătoarelor solare pe timp de noapte sau în condiții de radiație solară scăzută, așa cum se reflectă în clusterul albastru deschis. Dezvoltarea tehnologiilor hibride cu materiale avansate de stocare termică ar putea fi un domeniu cheie de studiu.

Utilizarea eficientă a căldurii lente: Cercetarea privind căldura latentă și dezvoltarea materialelor avansate cu schimbare de fază este esențială pentru îmbunătățirea eficienței sistemelor de stocare a energiei. Cercetările viitoare pot explora noi PCM-uri cu proprietăți termice îmbunătățite și durabilitate pentru aplicații în uscătoare solare și alte sisteme de procesare.

2.2 Provocări și oportunități în implementarea uscătoarelor solare hibride

2.2.1 Provocări tehnice și operaționale în integrarea PCM

Materialele cu schimbare de fază (PCM) sunt utilizate pe scară largă în aplicațiile de stocare a căldurii latente (LHS) datorită capacității lor de a stoca de

5 până la 14 ori mai multă căldură pe unitate de volum în comparație cu materialele sensibile de stocare a căldurii, cum ar fi apa, zidăria sau roca [79]. Cu toate acestea, acestea prezintă mai multe provocări tehnice care le limitează performanța în aplicațiile de uscare solară. Una dintre principalele probleme este conductivitatea termică scăzută a majorității PCM, care afectează eficiența transferului de căldură în timpul ciclurilor de încărcare și descărcare [80]. Această problemă poate fi abordată prin utilizarea aripioarelor metalice sau prin încorporarea aditivilor pentru a îmbunătăți conductivitatea termică, deși aceste soluții cresc complexitatea și costurile de fabricație. În plus, multe PCM-uri prezintă probleme de suprarăcire și topire incongruentă, ceea ce duce la un transfer de căldură neuniform și o eficiență redusă de uscare. Pentru a atenua aceste efecte, pot fi utilizați agenți nucleați sau pot fi proiectate sisteme pentru a menține stabilitatea fazei în intervalul de temperatură dorit. Cu toate acestea, aceste modificări cresc costurile de integrare și complică funcționarea, ceea ce face ca adoptarea lor să fie dificilă în mediul rural sau cu resurse reduse [81].

În ciuda avantajelor PCM-urilor în stabilizarea termică, utilizarea lor în uscătoare solare implică costuri ridicate și provocări de durabilitate [82]. Parafina, un PCM utilizat pe scară largă, este preferată pentru costul său redus și stabilitatea chimică, dar conductivitatea sa termică scăzută și nevoia de încapsulare cresc costurile de implementare cu 15% până la 30% în comparație cu alte materiale de stocare termică [66]. În plus, PCM-urile eutectice pe bază de sare au un cost de trei ori mai mare decât parafina convențională, ceea ce le face nefezabile pentru aplicații la scară mică fără subvenții sau sprijin financiar [83]. Încorporarea tehnicilor de microîncapsulare și utilizarea nano PCM sporesc rata de transfer de căldură, dar implementarea lor crește semnificativ costul inițial al sistemului. Acești factori economici sunt exacerbați și mai mult de riscul de degradare termică și de necesitatea unor sisteme avansate de izolare pentru a menține eficiența pe termen lung, în special în condiții de mediu extreme [84]. Prin urmare, deși PCM-urile oferă un mare potențial de îmbunătățire a eficienței uscătoarelor solare, implementarea lor practică rămâne limitată de costurile ridicate și de complexitatea proiectării. În plus, dezvoltarea PCM-urilor biodegradabile și biocompatibile este necesară pentru a atenua impactul negativ asupra mediului al PCM-urilor convenționale [82,85].

2.2.2 Provocări în aplicarea modelelor CFD în condiții de mediu variabile

Simularea dinamicii fluidelor computaționale (CFD) este un instrument puternic pentru prezicerea comportamentului termic și a fluxului de aer în uscătoare solare; cu toate acestea, eficacitatea sa este compromisă atunci când

este supusă unor condiții de mediu variabile, cum ar fi radiația solară fluctuantă și umiditatea relativă [43,86]. Modelele CFD tradiționale presupun condiții la limită constante și parametri de mediu, ceea ce poate duce la erori semnificative atunci când condițiile reale se schimbă drastic pe parcursul zilei [1,72,87]. În scenariile în care radiația solară fluctuează cu mai mult de 40% între dimineață și după-amiază, a fost raportată o scădere a acurateții predicțiilor de temperatură internă pentru uscătoare. În mod similar, o creștere bruscă a umidității relative, așa cum se întâmplă în perioadele ploioase sau schimbările sezoniere, poate modifica distribuția umidității în interiorul uscătorului, ceea ce duce la rezultate CFD cu o marjă de eroare mai mare în comparație cu măsurătorile experimentale. Pentru a aborda aceste provocări, este esențial să se încorporeze date în timp real de la senzorii de mediu și să se ajusteze dinamic condițiile la limită în modelele CFD, ceea ce ar îmbunătăți acuratețea simulării. În plus, implementarea simulărilor de stare tranzitorie cu pași de timp mai scurți ar spori și mai mult precizia. Cu toate acestea, implementarea acestei metodologii crește complexitatea computațională și costurile de monitorizare, limitând aplicabilitatea acesteia în uscătoarele solare low-tech sau în setările cu resurse limitate [88].

2.2.3 Provocările interdisciplinare în dezvoltarea tehnologiilor de uscare solară

Dezvoltarea și implementarea tehnologiilor de uscare solară, în special cele care integrează inovații precum materialele cu schimbare de fază (PC) sau simulările de dinamică a fluidelor computaționale (CFD), necesită o colaborare interdisciplinară care prezintă adesea provocări semnificative. Integrarea cunoștințelor din ingineria termică, științele agricole și economia rurală este esențială pentru proiectarea sistemelor care nu sunt doar eficiente din punct de vedere tehnic, ci și viabile din punct de vedere economic și acceptabile din punct de vedere cultural în diferite regiuni. Cu toate acestea, implicarea părților interesate din diverse discipline necesită o investiție substanțială de timp și resurse, ceea ce nu este întotdeauna fezabil pentru proiectele la scară mică. Această limitare împiedică implementarea sistemelor avansate de uscare solară în medii cu infrastructură limitată, cum ar fi țările în curs de dezvoltare.

În concluzie se evaluează o creștere semnificativă a publicațiilor despre uscătoarele solare în ultimii ani, reflectând un interes tot mai mare pentru dezvoltarea tehnologiilor durabile pentru uscarea produselor agricole, în special în utilizarea energiei solare și a sistemelor de stocare a energiei. Cele cinci clustere tematice identificate în analiza bibliometrică evidențiază diversificarea cercetării

în domenii precum generarea de energie, stocarea termică și modelarea proceselor, indicând o abordare multidisciplinară pentru îmbunătățirea eficienței și eficacității uscătoarelor solare.

Luată împreună, studiile colectate demonstrează că integrarea tehnologiilor de stocare termică, a proiectelor optimizate și a metodelor inovatoare de transfer de căldură în uscătoarele solare poate îmbunătăți semnificativ eficiența, reduce costurile de operare și crește calitatea produselor agricole uscate. Aceste inovații nu numai că promovează sustenabilitatea și reducerea impactului asupra mediului, dar facilitează și adoptarea uscătoarelor solare în diferite regiuni, în special în țările în curs de dezvoltare, unde conservarea post-recoltare este crucială pentru securitatea alimentară și bunăstarea economică a comunităților agricole.

În cele din urmă, rezultatele subliniază necesitatea cercetării și dezvoltării în continuare a tehnologiilor avansate, cum ar fi utilizarea materialelor cu schimbare de fază (PCM) și simulările de dinamică a fluidelor computaționale (CFD), pentru a optimiza sistemele de uscare solară și pentru a îmbunătăți aplicabilitatea acestora în diverse condiții climatice și la o scară mai largă.

2.3 Cercetari privind solutiile constructive

În multe părți ale lumii există o conștientizare din ce în ce mai mare a faptului că energia regenerabilă are un rol important în extinderea tehnologiei de uscare la fermierii din țările în curs de dezvoltare pentru a-și crește productivitatea (Waewsak, si al., 2006). Tehnologia solară termică este o tehnologie care este rapid acceptată ca măsură de economisire a energiei în aplicațiile din agricultură. Este preferată altor surse alternative de energie, cum ar fi eoliana sau gaze de șist, deoarece este abundentă, inepuizabilă și nepoluantă [18] (Akinola 1999; Akinola și Fapetu 2006; Akinola et al., 2006).

Utilizarea uscătoarelor în țările în curs de dezvoltare poate reduce pierderi energetice și contribuie în mod semnificativ la disponibilitatea fructelor pe tot parcursul anului. Estimările acestor pierderi sunt în general citate ca fiind între 40% și 80%. Un procent semnificativ din aceste pierderi sunt legate de uscarea necorespunzătoare și/sau prematură a chipsurilor de fructe, cum ar fi banana, mango, măr, etc. (Bassey, 1989; Togrul și Pehlivan, 2004)[19].

Cel mai simplu design pentru un uscător solar a fost dezvoltat de Brace Institutul de Cercetare, Canada. Este în esență o cutie fierbinte în care fructele, legumele sau alte materiale pot fi deshidratate la scară mică (vezi figura 10).

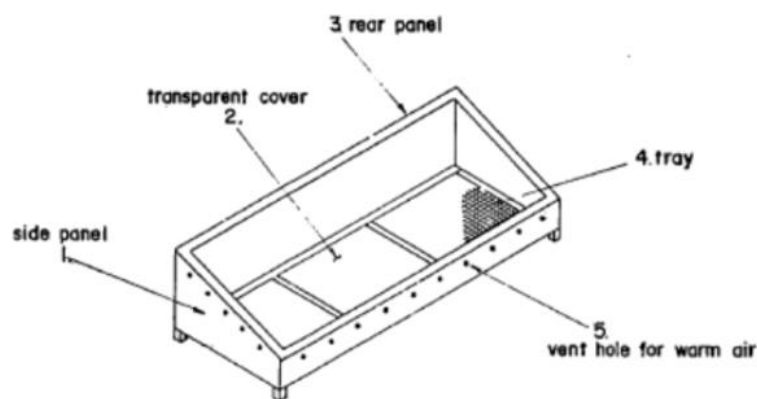


Figura 10. Cutie - uscător solar

Construcția unui astfel de uscător poate lua multe forme. Cu toate acestea au fost recomandate anumite specificații. Rezultatele experimentale la Kanpur, India (Chantawanasri, 1978) pentru uscarea fructelor și legumele au arătat că prin uscarea solară s-a economisit timp considerabil în comparație cu uscarea în aer liber. De asemenea, produsul obținut din uscatorul cu energie solară s-a dovedit a fi superior ca gust și miros produselor uscate la soare și nu a fost contaminat cu praf sau infestat cu insecte.

Bahnasawy și Shenana (2004) au dezvoltat un model matematic pentru uscarea directă la soare a unor produse lactate fermentate (kishk). Principalele componente ale ecuațiilor care descriu sistemul de uscare au fost radiațiile solare, convecția de căldură, căldura câștigată sau pierdută de la uscător peretele coșului și căldura latentă a evaporării umezelii. Modelul a fost capabil să estimeze temperaturile de uscare la o gamă largă de valori ale umidității relative. De asemenea, are capacitatea de a estima pierderea de umiditate din produs la intervale largi de valori de umiditate relativă, temperaturi și viteze de aer [20].

Soponronnarit (1995) a trecut în revistă activitatea de cercetare și dezvoltare în uscare solară efectuată în Thailanda pe o perioadă de 15 ani (începând cu 1980). El a descoperit că, din punct de vedere tehnic și economic, uscarea solară pentru unele culturi de paioase sau fructe și legume sunt fezabile. Cu toate acestea, metoda nu a fost acceptată pe scară largă de fermieri. Cele mai multe dintre încălzitoarele solare de aer dezvoltate în Thailanda au fost modificate constructiv. Atât încălzitoarele solare de aer simple, cât și cele acoperite cu sticlă au fost raportate ca fiind fezabile din punct de vedere tehnic și economic în comparație cu utilizarea energiei electrice, dar nu au putut concura cu păcura.

Pangavhen, și colab. . (2002) a propus proiectarea, dezvoltarea și testarea performanței unui uscător solar cu convecție care este capabil să producă o temperatură medie cuprinsă între 50 și 55 °C, și care ar fi optimă pentru deshidratarea strugurilor, precum și pentru majoritatea fructelor și legumelor.

Acest sistem a fost capabil să genereze un flux natural de aer cald pentru a îmbunătăți rata de uscare. Debitul de aer de uscare crește odată cu temperatura ambiantă prin flotabilitatea termică din colector. Eficiența colectorului a variat între 26% pentru *masa-flow* rata de 0,0126 kg/s de aer și 65% pentru debitul masic de 0,0246 kg/s. Acesta era suficient pentru încălzirea aerului uscat. Timpul de uscare a strugurilor a fost redus cu 43% comparativ cu uscarea la directă la soare.

Ekechukwu și Norton (1999) au prezentat o analiză cuprinzătoare pentru diverse proiecte, detalii de construcție și principii de funcționare pentru o varietate de sisteme uscare cu energie solară, pentru aplicațiile utilizate de către fermierii rurali din țări în curs de dezvoltare.

Sebaili, și colab. . (2002) au prezentat un studiu de convecție solară de tip indirect pentru uscarea strugurilor, smochinelor, cepei, merelor, roșiilor și mazărei verzi. Parametrii uscării pentru culturile selectate au fost obținute din rezultate și apoi au fost corelate cu temperatura produsului de uscare. Corelația liniară dintre constanta de uscare și temperatura produsului a fost propusă pentru culturile selectate. Constantele empirice ale lui Henderson pentru toate materialele din investigație, nu sunt disponibile în literatură. Corelația empirică propusă a sugerat că ar putea descrie bine cinetica de uscare a culturilor [20].

Gallali, și colab.. (2000) au prezentat rezultatul unei cercetări asupra unor fructe și legume pe baza analizei chimice (vitamina C, total zaharuri, aciditate, umiditate și conținut de cenușă) și senzoriale (color, aromă și textură). Au comparat produsele uscate în uscătoare solare cu cele uscate natural la soare. Studiul a indicat că utilizarea uscătoarelor solare oferă mai multe avantaje decât uscarea naturală la soare, mai ales în ceea ce privește timpul de uscare.

Karathanos și Belessiotis au studiat uscarea cu energie solară cu aer încălzit pentru struguri, coacăze, smochine, prune și caise. Ratele de uscare au fost găsite atât pentru energia solară, cât și pentru operațiuni de uscare industrială. Temperaturile aerului și ale produselor au fost măsurate pentru întregul proces de uscare industrială. S-a demonstrat că majoritatea materialele au fost uscate în perioada de scădere. Coacăze, prune, caise au prezentat două perioade de viteză de uscare, una aproape constantă și a doua perioadă de uscare în scădere rapidă . În plus, au aratat că din operația de uscare industrială a rezultat un produs de calitate superioară în comparație cu produsele uscate de deshidratarea solară [21].

Sursa:

https://www.researchgate.net/publication/264509182_Use_of_Renewable_Sources_of_Energy_for_Drying_of_FVF

Kabeel și colab. [10] a făcut o revizuire amplă cu privire la configurațiile de proiectare și îmbunătățirile SAH. Ei proiectează în mod clar că există mai multe lacune pentru a lucra cu eficiența SAH, ținând cont de simplitate, design și cost. Singh și colab. [11] au arătat experimental îmbunătățirea eficienței colectorului până la maximum 33 % față de tipul convențional prin utilizarea unui pasaj cu gura clopot la [intrarea de aer](#) a SAH-ului lor. Gilani și colab. [12] a investigat efectul retenției de căldură în încălzitoarele solare [cu convecție naturală cu performanțe scăzute](#). Ei au folosit turbulatoare de dimensiuni mici, cu pas de 16 mm și înălțime de 4 mm în [placa absorbantă](#) și au constatat o creștere a eficienței energetice cu 26,5 %, în special la înclinări de 45°. Vengadesan și Senthil [13] au revizuit că suprafața [de transfer de căldură](#) și timpul de stagnare sunt doi parametri importanți care influențează performanța colectoarelor utilizate în uscătoarele [solare pentru încălzirea aerului](#). Eficiența unor astfel de colectoare va fi sporită cu până la 71,4 % – 93 % dacă introducem obstacole precum deflectoare, turbulatoare și alte [elemente de rugozitate](#) în placa absorbantă. De asemenea, au sugerat că utilizarea PCM cu aripioare poate crește eficiența cu 0,1 % – 4 %. Fakoor Pakdaman și colab. [14] a evaluat performanța colectorului solar cu plăci plane de încălzire a aerului (FPC) în modul [de convecție naturală](#) cu placă absorbantă având o matrice de aripioare atașată longitudinal. Au crescut [suprafața de transfer de căldură](#) cu 66 % și au susținut o creștere a transferului de căldură cu aproximativ 20 %. În concluzia lor, ei recomandă cu tărie că izolația solară și temperatura ambientală sunt cei doi factori independenți care influențează direct performanța unui astfel de FPC SAH convectiv natural, deși eficiența sa globală pare scăzută. Designul [experimental](#) dezvoltat de Jain și Tewari [15] are un colector solar plat cu [stocare de energie termică](#) într-un uscător solar [cu convecție naturală](#). Ei au dezvoltat că patul umplut cu 50 kg de PCM eliberează căldură timp de 5 – 6 ore chiar și după ora de soare, ceea ce duce la o creștere de 60 °C a temperaturii în interiorul camerei de uscare. De asemenea, sistemul este suficient pentru a genera o rentabilitate de 0,65 ori costul capitalului cu o [perioadă simplă de rambursare](#) de 1,57 ani. Salih și colab. [16] a creat dovezi experimentale pentru a demonstra că și încălzirea liberă a aerului convectiv produce rezultate bune, atingând o eficiență maximă de 73,5 % în comparație cu [convecția forțată](#), care pretinde doar 65 % eficiență. În analiza lor, ei au folosit SAH dublă trecere atât în modul [de convecție naturală, cât și în modul forțat](#), în special în anotimpurile de iarnă. Se constată că adăugarea aripioarelor în SAH duce la îmbunătățiri apreciabile ale performanței față de tipul convențional și ajung la o concluzie

importantă că „creșterea [debitului de aer](#) are o influență inversă la colectorii pereni”.

Bolaji și Olalusi [17] au proiectat și construit o instalație experimentală pentru uscare solară care poate fi operată atât în mod direct, cât și indirect pentru conservarea alimentelor. Ei au dezvăluit din evaluările lor că o creștere apreciabilă și susținută a temperaturii este posibilă în interiorul camerei de uscare și a colectorului pentru majoritatea orelor de soare, în comparație cu condițiile ambientale. Există, de asemenea, o creștere semnificativă a temperaturii de aproximativ 74 % observată imediat după trei ore de la miezul prânzului în interiorul camerei de uscare. Mohanraj și Chandrasekar [18] au dezvoltat un uscător solar indirect folosind diferite substanțe sensibile de stocare a căldurii. Ei au demonstrat că, sub [convecție forțată](#), conținutul de umiditate al ardeiului iute poate fi redus de la ~ 72,8% (bază umedă) la 9,1% în intervalul de timp de 24 de ore. Pentru un debit de aer de 0,25 kg/s, au atins o eficiență energetică medie de 21 % și o rată specifică de extracție a umidității de 0,87 kg/kWh. Mugi și Chandramohan [19] au expus în mod deliberat nevoia unei analize extinse a datelor în [analiza exergie](#) a SAH, în special în uscarea solară indirectă (ISD), deoarece este necesar să se estimeze energia disponibilă a unui astfel de SAH pentru a atinge temperatura adecvată pentru uscare eficientă.

Macedo și colab. [20] a prezentat o procedură detaliată pas cu pas pentru proiectarea unui [colector cu jgheab parabolic](#). Capacitatea de concentrare a căldurii a acestui colector depinde de radiația solară directă similară cu [convecția naturală](#) SAH. Bharti și colab. [21] a analizat colectoarele parabolice și a constatat pierderi semnificative în capacitatea de concentrare a căldurii, deși colectorul este agil și înclinat pentru diferite unghiuri ale marginii cu radiații solare incidente. Pentru a avea un colector de jgheab static eficient, unghiul jantei trebuie să fie între 70° și 110°. Dovezile experimentale dezvoltate de Prakash et al. [22] justifică integrarea rețelei de colectoare cu jgheab parabolice cu colectorul cu placă plană având o placă absorbantă cu aripioare în trepte care reține eficient energia termică. Realizează un maxim de 66,32% energie termică și 23,06% [eficiență exergică](#). Acest colector este, de asemenea, foarte rentabil, cu un factor de performanță termo-hidraulic semnificativ de 1,4. Parametrii calculați de madhankumar și colab. [23] admite că există o creștere a costurilor cu 3,1 % pentru configurația lor dezvoltată, care oferă [o eficiență termică](#), un consum de energie și o rată specifică de extracție a umidității semnificativ ridicate.

După cum se observă din literatura de specialitate, majoritatea cercetărilor se concentrează pe asigurarea obstacolelor în calea curgerii aerului și, prin urmare, este posibilă creșterea [eficienței termice](#). Dar, acest fenomen de reducere a debitului masiv de aer poate fi foarte potrivit pentru [convecția forțată](#), dar nu și în [convecția naturală](#) [16].

Noutatea cercetării se concentrează pe acest decalaj de creștere a capacității de reținere a căldurii a aerului slab în mișcare în uscare solară prin convecție naturală, care este complet verde pentru a obține performanțe îmbunătățite. Uscătorul solar convectiv natural este utilitatea cel mai puțin preferată pentru uscarea produselor agricole la un ritm mai rapid în comparație cu cel forțat. Această cercetare consideră acest scenariu drept unul dintre factorii favorabili pentru a-l face eficient, fără a utiliza [sursa externă de energie](#) pentru îmbunătățire. Se realizează prin dezvoltarea unei configurații experimentale care utilizează o abordare integrată în proiectare prin combinarea colectoarelor concentrate și neconcentrate într-un singur uscător. Uscătorul solar propus este analizat pentru eficiența energetică a căldurii și potențialul de îmbunătățire într-un mod rentabil. Acest sistem nou se adaptează la tehnici simple de proiectare și va fi suficient de accesibil pentru a menține potențialul de temperatură pentru o perioadă de timp susținută. De asemenea, utilizarea materialelor cu schimbare de fază (PCM) în configurația propusă poate stoca energia termică și poate extinde timpul de recuperare a căldurii pentru a compensa costul suportat pentru uscare [23, 24].

Metodele de uscare solară oferă mai multe avantaje în comparație cu tehnicile convenționale de uscare. Eficiența energetică [22], rentabilitatea [25], sustenabilitatea mediului [26], păstrarea calității nutriționale [27] și calitatea îmbunătățită a produsului [28] sunt avantajele utilizării uscătoarelor solare.

Fudholi și colab. a dat direcțiile tehnice pentru dezvoltarea sistemelor de uscare asistată cu energie solară pentru produse agricole [29]. Jairaj și colab. a revizuit uscătoare solare exclusiv pentru uscarea strugurilor. Acestea au inclus diverse metode de pretratare și uscare pentru uscarea strugurilor de bună calitate [30]. Pentru locația din Malaezia, sistemul de uscare solar integrat cu colectoare solare pe bază de aer a fost revizuit de Fudholi și colab. Acestea au inclus aspectele energetice, economice și de mediu ale diferitelor uscătoare solare [31].

Mustayenp și colab. a prezentat un studiu privind proiectarea, performanța și aplicarea diferitelor uscătoare solare. Această recenzie s-a concentrat pe modelele de uscător solar potrivite pentru uscarea de înaltă calitate [32].

Hicham El Hage și colab. a revizuit pe larg aspectele economice și de mediu ale sistemului de uscare solară. Parametrii critici, cum ar fi perioada de amortizare sau atenuarea CO₂, au fost comparați [33].

Prakash și colab. a revizuit diferitele tehnici de modelare, inclusiv dinamica fluidelor computaționale (CFD), sistemul de inferență fuzzy bazat pe rețea adaptivă (ANFIS), rețele neuronale artificiale (ANN), FUZZY, modelarea termică, matematică, cinetică de uscare și energetică [34]. Azwin Kamarulzaman și colab. a analizat progresul global al tehnologiilor de uscare solară și perspectivele acestora. Si ei au prezentat diferiți parametri de performanță, inclusiv evaluarea energiei, perioada de amortizare și atenuarea CO₂ [35].

Aprajeeta Jha et al. a analizat progresele recente în proiectare, aplicare, simulare și studii ale tehnologiei hibride de uscare solară. Revizuirea a discutat despre diferitele software utilizate pentru simularea sistemului de uscare solară, inclusiv PHOENICS, FLUENT (software de uz general cu capabilități Multiphysics), FIDAP (modelare fizică complexă), ANSYS CFX, COMSOL Multiphysics, TRNSYS [36]. Nukulwar și colab. s-au concentrat pe diverse materiale utilizate la construirea uscătoarelor solare și evaluarea performanței acestora pentru produsele agricole [37].

Capitolul 3 - Uscatoare solare

3.1 Criterii de clasificare a uscătoarelor solare

Uscătorul solar poate fi clasificat pe baza următoarelor criterii:

- Modul de mișcare a aerului
- Expunerea la izolație
- Direcția fluxului de aer
- Amenajarea uscătorului
- Starea contribuției solare

Uscătorul solar poate clasifica în primul rând în funcție de modurile lor de încălzire și modul în care este utilizată căldura solară. În termeni generali, ele pot fi clasificarea în două grupe majore, și anume:

- Sistem activ de uscare cu energie solară
- Sistem pasiv de uscare cu energie solară

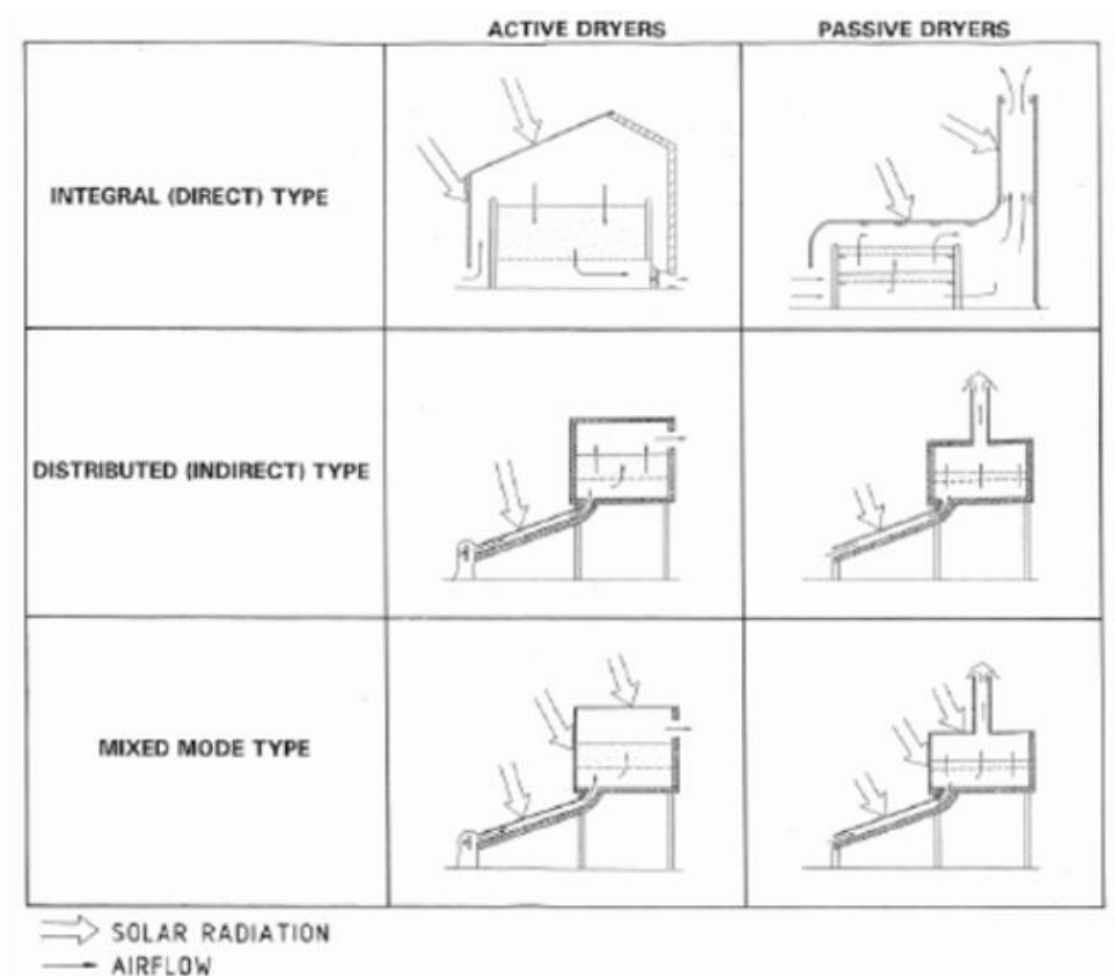


Figura 11 - Clasificarea uscatoarelor cu energie solara

3.2 Domenii de utilizare a uscătorului solar

- Uscarea culturilor agricole.
- Industriile de prelucrare a alimentelor pentru deshidratarea fructelor și legumelor.
- Uscarea peștelui și a cărnii.
- Industria lactatelor pentru producția de lapte praf.
- Tratarea lemnului și a cherestelei.
- Industriile textile pentru uscarea materialelor textile etc.,

3.3 Tipuri de uscatoare

Numeroși cercetători au dezvoltat și testat anterior diferite tipuri de uscătoare solare pentru eficiența operațională. Uscătoarele solare pot fi clasificate pe baza mișcării aerului încălzit, a designului și a incidenței radiațiilor solare. Principalele tipuri de încălzitoare solare pe aceste baze pot include tip direct, tip

indirect, tip mixt, uscătoare solare cu sisteme de stocare a căldurii, uscătoare solare cu mod pasiv și cu mod activ [7].

3.3.1 Uscător solar de tip direct

Într-un uscător solar de tip direct, produsul supus uscării este expus direct la radiația solară și este închis cu un capac transparent. Acest capac protejează produsul de condițiile meteorologice și, de asemenea, de particulele străine, dar permite trecerea energiei termice din radiațiile solare incidente [8].

3.3.2 Uscător solar de tip indirect

Uscătoarele solare de tip indirect oferă o eficiență termică ridicată în comparație cu tipul direct. Aceste tipuri de uscătoare au aer care trece prin colectorul solar, unde acest aer este încălzit de energia solară și apoi trecut în camera de uscare. În camera de uscare, transferul de căldură prin convecție are loc între acest aer cald și produsul care trebuie uscat, care în cele din urmă elimină umezeala din produs pentru a-l face să se usuce.

3.3.3 Uscător solar de tip mixt

Împreună cu sistemele de convecție naturală, sistemele de convecție forțată pentru o eficiență termică îmbunătățită au fost studiate și dezvoltate anterior [9]. Principiul de funcționare al uscătoarelor solare de tip mixt are ambele combinații de tipuri directe și indirecte. Acest tip de uscător prezintă o eficiență termică superioară în comparație cu ambele variante prezentate. Acest lucru este atribuit mecanismelor combinate de transfer de căldură care implică radiația solară directă și convecția [6,7]. Circulația aerului în uscătoarele solare poate fi realizată prin mijloace naturale și prin surse externe, adică prin utilizarea ventilatorului sau a suflantei pentru transferul de căldură prin convecție. Uscătoarele solare cu sursă naturală de circulație a aerului sunt uscătoare solare în mod pasiv, cunoscute și sub numele de uscătoare de seră [10], în timp ce cele cu circulație a aerului prin unele surse externe sunt uscătoare solare în mod activ [11].

Capitolul 4 - Procesul de uscare

Uscarea este una dintre cele mai vechi tehnici de conservare și depozitare a alimentelor, adesea realizată prin expunerea directă a alimentelor la lumina soarelui. Energia solară este o sursă importantă de energie regenerabilă care a câștigat o popularitate semnificativă în ultimele decenii. Această creștere este atribuită lipsei de combustibili fosili și poluării mediului asociată cu utilizarea lor.

Energia solară este cea mai abundentă sursă de energie regenerabilă datorită naturii sale gratuite, a respectării mediului și a disponibilității pe tot parcursul anului. Conversia energiei solare în căldură reprezintă cea mai frecventă și directă aplicare a acestei resurse [2]. Acest proces reduce eficient greutatea produsului prin reducerea conținutului de umiditate, rezultând hrană deshidratată care poate fi ambalată, depozitată și transportată convenabil. Eliminarea apei prin această tehnică din legume și fructe permite păstrarea acestora pentru perioade lungi de timp, deoarece apa este un factor cheie în inițierea reacțiilor fiziologice și chimice care duc la deteriorarea alimentelor [3]. Procesul de uscare la soare pentru conservarea alimentelor este eficient și durabil. Cu toate acestea, pentru producția la scară mai mare, uscarea la soare vine cu mai multe constrângeri cunoscute, inclusiv vulnerabilitatea la deteriorarea culturilor de către animale, păsări și deteriorarea calității cauzată de expunerea directă la radiațiile solare.

De asemenea, este important de reținut că uscarea la soare suferă pierderi substanțiale de energie termică din cauza faptului că doar o parte din energia solară incidentă este valorificată pentru procesul de uscare. Expunerea directă are, de asemenea, riscul ca alimentele să fie deteriorate de condiții meteorologice extreme sau să fie contaminate cu particule străine. Deci, alimentele trebuie uscate în mediu controlat pentru rezultate mai bune. Evoluția uscării la soare a dus la dezvoltarea sistemelor de uscare solară, în care produsele sunt uscate în medii închise, menținând temperaturi interne ridicate [4]. În această perspectivă, uscătoarele solare sunt sistemele sau dispozitivele care pot oferi soluția la problemele cu care se confruntă uscarea directă la soare. Uscătoarele solare utilizează energia solară ca sursă de căldură în scopuri de uscare, sporind în același timp eficiența termică în comparație cu uscarea directă la soare.

Aceste uscătoare alimentate cu energie solară au fost proiectate în diferite variante și o mare parte din consumul de combustibili fosili poate fi redus prin acestea [5]. Toate aceste variante de design pentru uscătoarele solare au același mecanism de evaporare a moleculelor de apă prezente în interiorul produselor. Modul de transfer de căldură către produs depinde de configurația de proiectare și poate fi realizat prin convecție sau radiație [6].

4.1 Notiuni si particularități ale procesului de uscare

Uscarea legumelor și fructelor este procesul tehnologic prin care se reduce conținutul natural de apă până la un nivel care să împiedice activitatea microorganismelor, fără a se distruge țesuturile sau a se deprecia valoarea alimentară a produselor.

Ansamblul de fenomene ce se produc în timpul uscării duce la concentrarea substanței uscate, reducerea volumului materiei prime folosite, creșterea valorii alimentare la unitatea de greutate și modificări fizicochimice mai mult sau mai puțin profunde în starea membranelor și componentelor celulare, care se exteriorizează prin limitele capacității de rehidratare.

Deshidratarea reprezintă procesul în virtutea căruia fructele și legumele pierd o anumită cantitate de apă, în urma cărui fapt se realizează o stare fizicochimică propice menținerii valorii lor nutritive și atributelor calitative: gust, miros, aroma.

Uscarea se deosebește de deshidratare prin lipsa de reglare a temperaturii, umidității relative și mișcării aerului, în care scop se folosește și expresia de uscare naturală, spre deosebire de deshidratare, care este o uscare artificială.

Diferența dintre uscarea naturală și cea artificială constă în natura energiei termice folosite și anume energie solară (uscarea naturală) și energia rezultată din arderea unui combustibil oarecare (uscarea artificială sau deshidratare) și viteza cu care se îndepărtează excesul de apă din materia primă respectivă.

În primul caz, prin simplă expunere la aer și la temperatura mediului ambiant, are loc îndepărtarea umidității din produse prin procesul de evaporare. În cazul al doilea, pentru a continua procesul deshidratării se apelează la un aport suplimentar de căldură, înlăturarea apei făcându-se prin procesul de vaporizare.

Evaporarea reprezintă trecerea apei în stare de vapori într-un mediu în care în afara vaporilor de apă există și aer și alte gaze.

Vaporizarea reprezintă trecerea apei în stare de vapori, într-un mediu în care există numai vapori de apă.

Evaporator este instalația de uscat fructe și legume în care mișcarea aerului se face de la sine, pe baza diferenței termice existente între atmosfera din evaporator și atmosfera externă.

Deshidrator este o instalație de uscat fructe și legume folosită pentru îndepărtarea excesului de apă din materia primă supusă deshidratării, în care cel puțin circulația aerului încălzit, viteza de mișcare, temperatura și umiditatea relativă a aerului sunt controlate automatizat, potrivit unor parametri fixați în prealabil pentru respectivă materie primă supusă procesului.

Pentru evaporarea apei din produsele supuse deshidratării, se utilizează diferite tehnici care constau dintr-o succesiune de operații tehnologice și se folosesc aparate și instalații mai mult sau mai puțin perfecționate cu un consum de energie mai mare sau mai redus și care, pe cât posibil, permit reducerea pierderilor de căldură. Evaporarea apei din legume și fructe este un proces

complex în care sunt implicate, pe de-o parte, structura anatomică a produselor, iar pe de altă parte unele legi fizico-chimice de constituire a substanțelor celulare ca și permeabilitatea membranelor celulare.

Randamentul reprezintă cantitatea de produs finit obținut din cantitatea de materie primă și se exprimă în procente.

Răția de uscare sau deshidratare reprezintă cantitatea de materie primă necesară pentru obținerea a 1 kg de produs finit;

În studiul și controlul proceselor de uscare, exprimarea umidității produsului se face cu ajutorul noțiunii de conținut de umiditate specific, care poate fi:

- conținut specific de umiditate raportat la materialul uscat:

$$W_{usc} = \frac{m_w}{m_{usc}} 100[\%].$$

unde: m_w este masa de apă din corp, în kg; m_{usc} - masa corpului uscat, în kg;

- conținutul specific de umiditate raportat la materialul umed:

$$W_{um} = \frac{m_w}{m} 100 = \frac{m_w}{m_{usc} + m_w} 100[\%]$$

unde: m_w este masa de apă din corp, în kg; m - masa corpului umed, în kg.

Între cele două moduri de definire a conținutului de umiditate există următoarele relații de transformare:

$$W_{usc} = \frac{W_{um}}{100 - W_{um}}; W_{um} = \frac{W_{usc}}{100 + W_{usc}}$$

În cazul uscării convective căldura se transmite produsului de uscare prin intermediul unui agent termic. Baza teoriei de uscare o reprezintă legăturile de transfer de căldură și de masă în materialele umede la existența transformărilor de fază. Teoria modernă de transfer de căldură și masă internă în corpurile umede, prezintă un șir de fenomene termodinamice nestaționare ireversibile, legate organic între ele, derulându-se sub acțiunea unor forțe termodinamice.

În baza legilor teoriei lui A.Lîkov de transfer de căldură și masă s-a obținut un sistem de ecuații diferențiale de transfer de căldură și masă în materialele umede la existența transformărilor de fază, cu evidența transferului convectiv a căldurii antrenate de fluxul vaporilor și a lichidului din material. Sistemul ecuațiilor diferențiale care descriu procesele elementare menționate are următoarea formă:

$$cp_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \operatorname{div} J_q + \varepsilon p_0 \frac{\partial U}{\partial \tau},$$

$$\rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} = - \operatorname{div} J_m$$

unde: c este capacitatea termică specifică a materialului umed, J/(kg·K); ρ_0 – densitatea substanței uscate, kg/m³; r – căldura specifică a transformării de fază, J/kg; ε – criteriul transformării de fază; J_q , J_m – reprezintă legitatea de transfer de căldură și masă; U , τ și t – respectiv umiditatea materialului, timpul de uscare și temperatura la care se desfășoară procesul de uscare.

Pentru a avea o imagine mai amplă privind procesele de transfer de căldură și masă care decurg în interiorul fructelor la uscarea lor cu diferite metode ale aportului de energie este necesară existența curbelor de uscare și vitezei de uscare. În scopul obținerii acestor dependențe a fost proiectată și construită o instalație experimentală de laborator care dă posibilitatea cercetării cineticii procesului de uscare prin metoda convectivă. Aceasta are în componența camera de uscare, caloriferul electric, alimentatorul cu agent termic și aparatul de măsurare.

Măsurarea temperaturii probei s-a efectuat cu o termocuplă crom-copel. Temperatura agentului termic s-a menținut constantă cu ajutorul unui sistem de reglare automată. Viteza agentului de uscare în perioada efectuării experimentelor s-a menținut constantă și a fost determinată din condiția de antrenare minimă a materialului de deshidratat. Această viteză s-a fixat cu micromanometrul MMH.

4.2 Metoda înregistrării scăderii de masă a fructelor.

Pentru excluderea erorilor înregistrării diferenței de masă a probei în experiențe a fost utilizată o balanță cu sensibilitatea de $\pm 2\text{g/div}$ și precizia de $\pm 5\%$. Celula de lucru de formă unui condensator coaxial încărcat cu fructe s-a suspendat de balanță prin intermediul unei suspensii speciale, asigurând posibilitatea de a măsura scăderea de masă în timp real.

Masa finală a produsului finit se poate determina prin calcul, cu ajutorul formulei:

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{100 - W_1}{100 - W_2}$$

unde: M_1 , M_2 reprezintă masa inițială și finală a produsului, g; W_1 , W_2 – umiditatea inițială și finală, %. În baza rezultatelor obținute s-au trasat curbele de uscare. Curbele vitezei de uscare s-au determinat prin diferențierea discretă a funcțiilor tabelate conform relațiilor:

$$\frac{dW}{d\tau}(W_0) = \frac{\sum_{m=-p}^p m \bar{W}_m}{n \sum_{m=-p}^p m^2}$$

în care, $\frac{d\bar{W}}{d\tau}(W_0)$ este valoarea vitezei de uscare aferentă umidității medii a produsului, în %/s; $\bar{W}_m$ - valoarea medie a conținutului de umiditate (în intervalul n) până și după momentul în care conținutul de umiditate a fost W_0 , în %: $m = -2; -1; 0; 1; 2$.

Valoarea vitezei de uscare pentru primele și ultimele două puncte s-a determinat cu formulele:

pentru primul punct:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau}(W_0) = \frac{-21W_1 + 13W_2 + 17W_3 - 9W_4}{20n}$$

pentru al doilea punct:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau}(W_1) = \frac{-21W_2 + 13W_3 + 17W_4 - 9W_5}{20n}$$

pentru penultimul punct:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau}(W_{n-1}) = \frac{-11W_{n-5} + 3W_{n-4} + 7W_{n-3} + W_{n-2}}{20n}$$

pentru ultimul punct:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau}(W_n) = \frac{-11W_{n-4} + 3W_{n-3} + 7W_{n-2} + W_{n-1}}{20n}$$

Cinetica procesului de uscare s-a studiat pentru caise, folosind aerul încălzit ca agent termic. Toate experimentele au fost efectuate la o viteză a agentului termic egală cu 0,65 m/s. Figura 12 reprezintă curbele uscării $W = f(\tau)$ și figura 13 – viteza uscării $\frac{\partial W}{\partial \tau} = f(W)$.

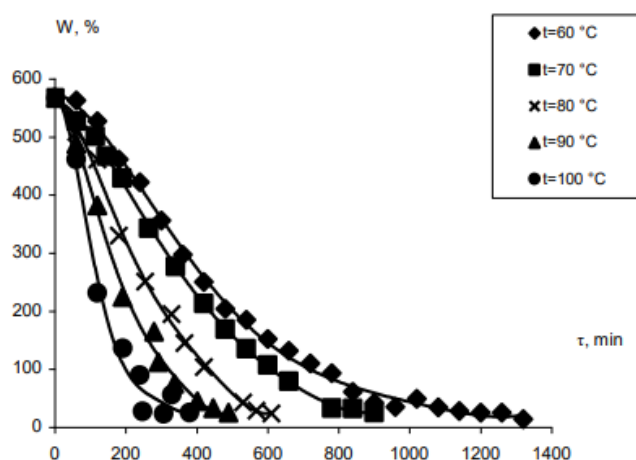


Figura 12 Curbele uscării convective a fructelor de caise

Temperatura agentului termic a fost de 60, 70, 80, 90 și 100 °C. Din grafice se observă că durata procesului de uscare a caiselor depinde, în mare măsură, de temperatura agentului termic. Rezultă că durata deshidratării caiselor scade considerabil cu creșterea temperaturii agentului termic.

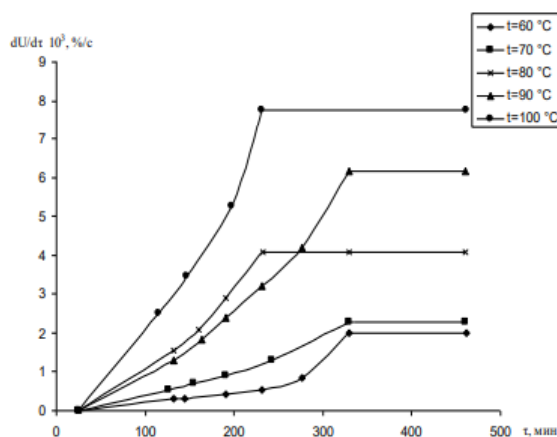


Figura 13 Curbele vitezei de uscare a fructelor de caise

Astfel, la temperatura de 60 °C, uscarea, însoțită de micșorarea umidității (la s.u.) de la 567 % până la 25 %, a durat 1317 min, însă la temperatura de 100 °C durata a scăzut la 370 min.

Analiza curbelor prezentate mai sus demonstrează că la uscarea convectivă se adevăresc noțiunile practice și teoretice existente în ce privește mecanismul transferului de masă în procesul de uscare. Ca și în sursele citate se evidențiază trei perioade: cea de creștere a vitezei de uscare, vitezei constante și a celei variabile. Mărirea temperaturii agentului termic este însoțită de creșterea valorii maxime a vitezei de uscare, fig. 2. 2.

Astfel, la temperatura de 60 °C, viteza maximă de uscare este de $14,55 \cdot 10^{-3}$ %/s, iar la temperaturile 70, 80, 90 și 100°C, respectiv: $16,29 \cdot 10^{-3}$ %/s, $23,17 \cdot 10^{-3}$ %/s, $25,07 \cdot 10^{-3}$ %/s și $26,90 \cdot 10^{-3}$ %/s.

Cu majorarea temperaturii de la 60 °C până la 100 °C, viteza de deshidratare crește de 1,9 ori. La conținutul mai redus de umiditate transferul de apă are loc preponderent sub formă de aburi. Astfel, este înlăturată apa legată prin legăturile de absorbție.

În perioada a doua, forma curbei de uscare depinde de structura materialului, care și determină mecanismul de migrare a apei. Pe baza datelor obținute au fost calculați coeficienții vitezei de uscare în perioadele I- K1 și -II K2.

În tabelul 2 sunt prezentate temperatura uscării t , $^{\circ}\text{C}$, umiditatea critică W_{cr} , %, vitezele uscării în perioada I, $dW/d\tau$, %/min, durata încălzirii τ_{inc} , min, și uscării în ambele perioade τ_1 și τ_2 , min.

Tabelul 2. Parametri uscării convective

N_0	t°, C	$W_{cr}, \%$	$dW/d\tau \cdot 10^3, \%$ %/s	$K_1, \%$ %/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$K_2 \cdot 10^6, \text{s}^{-1}$	τ_{inc}, min	τ_1, min	τ_2, min	τ_{tot}, min
1	60	325	14,55	50,96	1,3	100	899	328	1317
2	70	325	16,29	51,73	1,6	92	621	161	874
3	80	235	23,17	54,96	1,7	71	402	137	610
4	90	325	25,07	56,98	2,4	60	328	92	480
5	100	235	26,90	58,02	3,0	42	268	60	370

Transferul de masă și căldură în procesul de uscare a caiselor prin metoda convectivă este determinat de acțiunea celor doi gradienti: gradientul de temperatură și cel de umiditate. Orientarea opusă a gradientului de umiditate și a celui de temperatură prezintă un dezavantaj al uscării convective, deoarece conductibilitatea termică de apă împiedică procesul de uscare. Astfel poate fi explicată durata majorată a uscării convective. Ca urmare, se poate concluziona că uscarea convectivă la temperatură majorată este mai avantajoasă, totodată obținând un produs uscat de calitate înaltă.

4.3 Teoria uscării

Îndepărtarea excesului de apă din materia primă este condiționată de transmisia căldurii și de starea și mișcarea vaporilor de apă. Transmisia căldurii se realizează pe baza diferenței de temperatură între materialul supus deshidratării – fructele – și purtătorul de căldură – aerul cald.

În cursul deshidratării fructelor și legumelor într-un curent de aer, apa liberă este antrenată imediat prin evaporare. Această evaporare rapidă depinde de suprafața totală a fructelor (legumelor), de viteza de circulație a aerului și de diferența dintre tensiunea superficială a vaporilor de la suprafața materialului și tensiunea superficială a vaporilor din curentul de aer. În timpul uscării fructelor și legumelor apa din suc celular difuzează până la suprafață, datorită difuziei interne și se evaporă.

Deplasarea apei din interiorul produsului spre exterior este ca urmare a procesului de difuzie internă și este consecința directă a diferenței de presiune osmotică determinată de o concentrație diferită în substanțe solubile a lichidului din interiorul și de la periferia particulei de produs. Deplasarea apei are loc din punctele cu un conținut mai mare de apă spre cele cu un conținut mai mic,

rezultate în urma evaporării apei prin fenomenul de difuzie externă. Datorită difuziei interne se realizează în final egalizarea umidității în toate straturile produsului supus deshidratării.

În afara difuziei interne trebuie avută în vedere și termodifuzia apei, provocată de diferența de temperatură dintre straturile periferice și cele interioare ale produsului. Termodifuzia este fenomenul invers difuziei interne, adică provoacă deplasarea apei din exterior spre interior, temperatura exterioară fiind superioară. Deoarece însă, diferențele de temperatură nu sunt prea mari, difuzia internă este mai mare decât termodifuzia și în ansamblu predomină mișcarea apei din interior spre exterior.

Crăparea suprafeței periferice sau a epidermei produsului, de exemplu la prune, are loc atunci când viteza de evaporare a apei de la suprafața produsului este mult mai mare decât viteza de difuzie internă, ducând prin aceasta la formarea aşanumitei cruste la suprafața produsului.

Pentru evitarea acestui neajuns, temperatura și umiditatea relativă a aerului trebuie să fie reglate cu deosebită grijă.

Prin încălzire, umiditatea relativă a aerului scade. Astfel, dacă la 15°C umiditatea relativă a aerului este de 60%, prin încălzire la 60°C aceasta ajunge la 5%. Teoretic deci, este indicat să se utilizeze aerul la o temperatură cât mai ridicată, deoarece capacitatea de absorbție a apei din produs este cu atât mai mare, cu cât umiditatea relativă a aerului este mai scăzută.

Există totuși o limită care nu trebuie depășită și care este determinată de:

1. temperatura la care fructele sau legumele încep să se degradeze (caramelizarea zahărului, ireversibilitatea la rehidratare);
2. umiditatea relativă a aerului cald să nu se apropie de zero deoarece aerul prea uscat duce la formarea crustei, împiedicând difuzia apei din interior spre suprafața de evaporare și, prin aceasta, încetinind uscarea;
3. temperatura aerului prea ridicată, la finele procesului, face ca o cantitate mare de căldură să fie neutilizată, realizându-se astfel un randament caloric scăzut. De asemenea o temperatură prea ridicată la uscare prilejuiește denaturarea aromei și culorii produselor.

În general, la deshidratarea fructelor, temperatura aerului la intrarea în instalație este de 70-72°C și cu o umiditate relativă de 20-25%. La ieșirea din uscător, temperatura este mai coborâtă, între 40-45°C, iar umiditatea relativă este de 60-70%.

Viteza de deshidratare este condiționată și de viteza difuziei interne a apei, aceasta depinzând la rândul ei de mărimea particulelor de fructe sau de legume.

Temperatura și viteza de deplasare a aerului cald, sunt factori care condiționează randamentul economic al procesului de uscare.

Cu cât viteza de evaporare este mai mare, cu atât și difuzia crește, aceasta fiind valabilă până la o anumită limită. Depășirea acestei limite determină formarea crustei. Sub valoarea limită menționată, există posibilitatea ca viteza de difuzie să fie egală cu viteza de evaporare a apei. Sub o anumită valoare a vitezei de evaporare, uscarea poate deveni neeconomică din cauza cheltuielilor sporite de energie termică pentru evaporarea apei și de energie mecanică pentru vehicularea aerului.

Desfășurarea optimă a procesului are loc în momentul în care viteza de evaporare a apei de la suprafața fructelor și legumelor este egală cu viteza de migrare a umidității din interior spre suprafața lor. Pentru a obține o deshidratare rapidă, fructele și legumele sunt tăiate în bucăți mici, reducându-se prin aceasta timpul necesar pentru difuzia apei și mărindu-se suprafața totală de evaporare. Caisele se taie în jumătăți, merele și perele în felii, strugurii și prunele se lasă întregi, iar legumele sunt tăiate sub formă de felii, cuburi, tăiței etc.

Viteza de circulație a aerului influențează de asemenea procesul uscării. Dacă circulația aerului este prea înceată uscarea se va desfășura încet deoarece aerul se va satura foarte repede cu umiditate. Viteza de deplasare a aerului în uscătorul tunel este în general cuprinsă între 3-5 m/sec.

Practic, pentru realizarea în condiții optime a procesului de deshidratare, trebuie să se determine temperatura maximă pe care o poate suporta fiecare produs, respectiv temperatura de intrare în agregat și cea la care trebuie să iasă aerul încărcat cu umiditate, pentru a se evita condensarea acesteia.

4.3.1 Efectele deshidratării asupra dezvoltării microorganismelor și activității enzimatică

Celulele microorganismelor suferă în cursul procesului de deshidratare aceleași fenomene ca și celulele produselor alimentare de natură vegetală: creșterea continuă a presiunii osmotice, micșorarea vacuolelor din suc celular, permeabilizarea membranei protoplasmatică etc., fenomene care duc la tulburarea metabolismului și chiar la plasmoliza lor.

În general, microorganisme nu pot trăi pe substraturi sărace în apă, respectiv pe medii cu presiuni osmotice ridicate. Procesul de nutriție, ca și cel de eliminare a produselor de metabolism a microorganismelor se realizează prin fenomenul de osmoză prin membranele semipermeabile ale celulelor.

Micșorarea conținutului de apă îngreunează aceste schimburi osmotice și deci influențează negativ activitatea vitală a acestora. Pe de altă parte, enzimele, care sunt sensibile față de căldură, își reduc sau își anulează activitatea odată cu ridicarea temperaturii. La unele dintre enzime, de exemplu la fenoloxidază, se reduce activitatea catalitică la 2% dacă substratul este încălzit la 85°C și este complet anulată la 90°C.

Temperatura optimă de activitate a enzimelor din fructe și legume este de cca. 43°C. Această temperatură variază însă atât după natura substratului, cât și a enzimelor. Temperatura la care enzimele sunt inactivate depinde mult de aciditatea sau alcalinitatea mediului (pH) în care sunt încălzite, rezistența maximă înregistrându-se în jurul punctului de neutralitate. În mediu acid inactivarea decurge mai ușor.

La temperatura de 75°C, în cazul opăririi sau aburirii, enzimele încep să fie inactivate dar în legumele și fructele supuse uscării această temperatură și altele mai ridicate nu sunt atinse decât în cazuri rare și mai ales nu în toată masa lor.

Deshidratarea în condiții industriale obișnuite nu permite să se atingă temperaturi vecine cu 85°C și deci nu asigură inactivarea enzimelor. Din această cauză legumele trebuie opărite înainte de deshidratare. Atunci când nu s-a procedat la inactivarea enzimelor prin opărire sau aburire, în multe cazuri efectul activității enzimelor oxidative este mai intens la produsele deshidratate, decât la materiile prime din care provin. Aceasta datorită concentrării substraturilor asupra cărora acționează enzimele. Așa de exemplu, cartofii uscați fără opărire prealabilă se înnegresc mai repede în comparație cu feliile de cartofi nedeshidratați.

În cazul umezirii legumelor uscate uneori se produce o regenerare parțială a enzimelor. De aceea, în practica industrială se procedează la inactivarea enzimelor din fructe și legume înainte de uscarea lor, prin tratarea termică.

4.3.2 Efectele deshidratării asupra fructelor și legumelor

Deshidratarea are ca efect zbâncirea fructelor și legumelor datorită atât scăderii conținutului de apă, cât și micșorării volumului inițial. Pierderile în greutate se datoresc îndepărtării excesive de apă și, în oarecare măsură, modificărilor chimice și biochimice care se produc în cursul procesului.

În cadrul modificărilor fizico-chimice se include coagularea substanțelor proteice, care în condițiile deshidratării industriale este parțial reversibilă. Din cauza măririi concentrației de zahăr a sucului celular în decursul deshidratării se înregistrează creșterea presiunii osmotice.

Prin micșorarea conținutului de apă se mărește concentrația în acizi organici (scăderea valorii pH-ului) care influențează la rândul ei unele modificări

chimice, cum sunt: denaturarea proteinelor, hidroliza zaharurilor etc. Prin deshidratare se înregistrează, de asemenea, pierderi de zaharuri față de conținutul inițial, care variază între 1 și 8%.

Uleiurile eterice se volatilizează ușor la temperaturi superioare limitei de 50-60°C, iar pigmentii vegetali își modifică culoarea, de exemplu, legumele verzi își schimbă culoarea în verde-galben, iar legumele și fructele galbene se brunifică sau se decolorează prin deshidratare. Cauzele acestor modificări sunt fie de natură enzimatică, fie de natură termică.

4.3.3 Formele de legare a apei în fructe și legume

Produsele vegetale conțin peste 80% apă. Aceasta se prezintă legată diferit în complexul substanței organice și anume:

1. Apa liberă, legată mecanic sau capilară, reprezintă cca. 70% din totalul umidității produselor alimentare, în care sunt solubilizate cantități apreciabile de: zaharuri, acizi, săruri etc. Apa liberă umple capilarele produsului, precum și spațiile intercelulare.

Această formă de apă este denumită și apă liberă deoarece îndepărtarea ei este supusă legilor evaporării lichidelor de pe suprafețe libere. La uscarea produselor alimentare această apă este îndepărtată cu ușurință.

1. Apa legată fizic, cuprinde cantitatea de apă adsorbită și absorbită de substanțele coloidale. Această apă se îndepărtează mult mai greu prin influența căldurii deoarece este reținută mult mai puternic în produsele alimentare: fructe, legume, carne, pește etc.

Apa coloidală, de umflare, este apa absorbită osmotice de particulele coloidale. Apa de adsorbție, denumită și apa de hidratare, este reținută de forțele moleculare pe suprafețele particulelor coloidale.

1. Apa legată chimic intră în însăși compoziția moleculelor ca apă de constituție sau de cristalizare și nu poate fi îndepărtată din produse fără a provoca degradarea lor.

4.3.4 Fenomenele de difuzie a apei.

Procesul de îndepărtare a apei din produs este determinat în mare măsură de fenomenul de difuzie a apei, adică de migrarea apei în cursul procesului de uscare.

1. Difuzia externă reprezintă evaporarea apei de pe suprafața produsului supus uscării. La începutul procesului de uscare produsul are încă o umiditate ridicată, evaporarea de pe suprafețe având loc în condiții asemănătoare cu aceea de pe suprafețele lichidelor libere, adică viteza de evaporare este

determinată de suprafața de evaporare, de temperatură, de viteza de circulație a aerului și de umiditatea sa relativă.

2. Difuzia internă reprezintă deplasarea apei din interiorul produsului spre suprafață și determină desfășurarea finală a uscării. Deplasarea apei se face din părțile cu un conținut de apă mai mare, spre cele cu un conținut mai mic, în urma evaporării apei prin fenomenul de difuzie externă.

Procesul de difuzie internă determină egalizarea umidității în toate straturile produsului supus uscării. În procesul de uscare, o mare importanță o are raportul dintre difuzia internă și cea externă. Dacă viteza difuziei externe o depășește pe cea a difuziei interne, atunci suprafața produsului se usucă foarte mult, formând o pojghiță (fenomenul de scorjire) care îngreunează procesul ulterior al uscării. Acest fenomen va împiedica difuzia internă a apei și va necesita o durată mai lungă de uscare.

4.3.5 Fazele procesului de uscare

Faza de preîncălzire (secțiunea 1-2) este aceea în decursul căreia căldura este consumată aproape în întregime pentru încălzirea produsului până la stabilirea unui echilibru între cantitatea de căldură transmisă produsului și cea consumată pentru evaporare.

Durata acestei faze este scurtă, depinzând îndeosebi de caracteristicile aerului cald și nu constituie propriu-zis o fază de uscare.

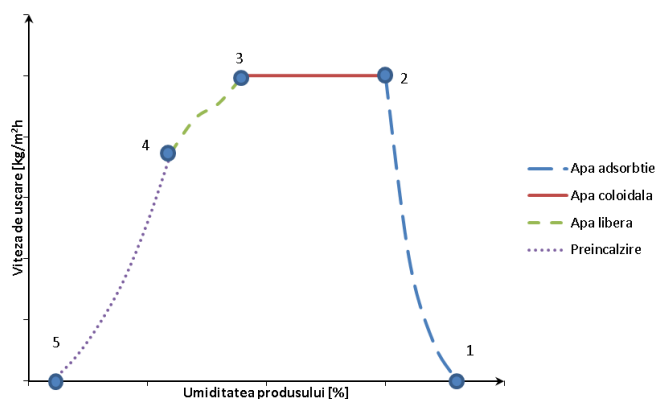


Figura 14 -Variația vitezei de uscare în funcție de umiditatea produsului

Faza de uscare cu viteză constantă (secțiunea 2-3) constituie perioada de uscare propriu-zisă și durează până la atingerea umidității higroscopice în stratul periferic al produsului. În această fază umiditatea de la suprafața produsului chiar dacă se micșorează, este totuși mai mare decât umiditatea higroscopică în această perioadă, viteza de uscare nu depinde de materialul supus prelucrării, ci de modul cum se realizează procesul.

Dacă nu se schimbă condițiile uscării, atunci viteza de evaporare pentru toate legumele și fructele și prin urmare și viteza de uscare se menține constantă. Viteza de evaporare este în acest caz aceeași pentru toate produsele și aproximativ egală cu viteza de evaporare a umidității de la suprafața apei atunci când condițiile de temperatură, presiune etc. rămân aceleași.

Evaporarea de pe suprafața materialului se realizează în măsura în care umiditatea din straturile interne ale produsului migrează către suprafață. Aceasta antrenează o anumită proporție din substanțele solubile (zaharuri, săruri etc.), substanțe care în anumite condiții duc la formarea crustei.

În această perioadă temperatura suprafeței produsului care se usucă rămâne practic constantă și egală cu temperatura indicată de termometrul umed al psihrometrului. Această situație se menține până în momentul când umiditatea de la suprafața produsului supus uscării devine egală cu umiditatea higroscopică. În situația enunțată, umiditatea produsului capătă denumirea de umiditate critică. Cantitatea de apă ce se evaporă de pe unitatea de suprafață, în unitatea de timp, se numește viteză de evaporare și se măsoară de obicei în $[g/(m^2 \text{ minut})]$.

Temperatura aerului se determină după indicațiile termometrului uscat, iar temperatura de la suprafața produsului (în faza de uscare cu viteză constantă) se determină după indicațiile termometrului umed.

Viteza de evaporare este influențată de asemenea și de toți ceilalți factori care influențează uscarea: temperatura și umiditatea aerului, viteza aerului, mărimea particulelor din produsul de uscat, coeficientul de transmisie a căldurii etc.

În timp ce apa de pe suprafața produsului se evaporă, umiditatea din capilare și din spațiile celulare difuzează treptat din interior spre straturile superficiale, astfel încât în această perioadă suprafața produsului rămâne mereu umedă. În această fază viteza de uscare rămâne constantă până ce nu mai difuzează suficientă apă din interiorul produsului spre exterior.

Perioada de uscare cu viteza descrescândă (secțiunile 3, 4, 5) în care viteza de uscare se reduce treptat, proporțional cu umiditatea produsului, are loc după ce materia primă atinge umiditatea critică. În această situație zona de uscare trece în adâncime, substanțele solubile rămânând în produs, spre deosebire de perioada de uscare cu viteza constantă, când acestea se deplasau spre suprafață.

Așa cum rezultă din fig. 14, în punctul 3 curba vitezei de uscare are o inflexiune bruscă, începând perioada de uscare cu viteză descrescândă în care se îndepărtează din produs o parte din apa legată și anume apa coloidală (3-4) și parțial cea din adsorbție (4-5). În această perioadă viteza de uscare depinde numai

de proprietățile produsului (structura și compoziția chimică) care influențează difuzia internă a apei și este independentă de parametrii aerului cald folosit la uscare.

Pe măsură ce uscarea avansează, temperatura produsului urcă și acesta devine higroscopic. Când se atinge umiditatea de echilibru, viteza de uscare devine nulă. Prin umiditatea de echilibru se înțelege umiditatea produsului care este în echilibru cu umiditatea relativă a aerului la temperatura de uscare. Această fază finală de uscare prezintă un interes deosebit pentru că depășirea unei anumite temperaturi a produsului duce la degradări calitative importante, care se exteriorizează printr-o structură cornoasă a suprafeței legumelor și fructelor uscare, cum și prin micșorarea capacității lor de rehidratare. De aceea, în faza finală, temperatura aerului cald trebuie micșorată.

4.3.6 Factorii care influențează uscarea

Agentul uzual folosit la uscarea fructelor și legumelor este aerul cald, care servește atât pentru transferul căldurii de la sursa de încălzire la produs, cât și pentru vehicularea apei evaporate.

Principalii factori care influențează procesul de uscare sunt:

4.3.7 Materia primă

Natura materiei prime sau felul fructelor și legumelor influențează în mod deosebit ritmul de uscare. În plus, viteza de uscare a diferitelor produse variază în funcție de diferitele forme sau dimensiuni în care sunt pregătite pentru uscare (cuburi, felii, tăiței, jumătăți sau felii de fructe etc.), precum și în funcție de conținutul de apă, care este foarte diferit. De exemplu, dacă se usuca morcovi și cartofi sub formă de cuburi de aceleași dimensiuni, în aceleași condiții de uscare (temperatura 70°C, viteza aerului 4 m/s și aceeași încărcătură pe m²), bucățile de morcovi ating umiditatea finală de 6% după 5-6 ore, pe când cele de cartofi după 7 ore.

4.3.8 Forma și gradul de mărunțire a materiei prime

Viteza de uscare variază cu forma și dimensiunile de divizare (tăiere ale materiei prime destinate prelucrării). Din analiza curbelor de uscare a cartofilor sub formă de tăiței de diferite mărimi, în condiții de încărcare a grătarelor cu 6-7 kg/m², la viteza aerului de cca 4,8 m/s, temperatura de uscare 70°C și temperatura termometrului umed de 35°C, se observă că o mică diferență în mărimea bucăților de legume determină modificări semnificative ale duratei de uscare. Diferența este evidentă în toate perioadele de uscare, însă devine mai pregnantă în perioada

finală de uscare, când umiditatea este mai scăzută, spre deosebire de perioada inițială cu umiditate mare, când diferențele sunt mult mai mici.

În timpul fazei inițiale de uscare, viteza de evaporare pe unitatea de suprafață se schimbă puțin, ea rămânând aproape constantă. Dacă comparăm o singură bucată de legumă sub formă de cub cu cele două jumătăți ale aceluiași cub de dimensiuni similare, suprafața acestora din urmă va fi cu 33% mai mare. Ritmul sau viteza de uscare la jumătățile de cuburi va fi și ea proporțional mai mare.

De asemenea, timpul de uscare poate fi redus până aproape la jumătate, dacă mărimea bucăților este redusă cât de mult posibil. Mărimea bucăților în care sunt tăiate legumele este determinată în primul rând de necesitatea desfășurării cât mai rapide a procesului de uscare și în mai mică măsură de preferințele consumatorilor.

Uscarea fructelor întregi, cum sunt prunele, reprezintă un caz special în care durata procesului este de 24-48 ore la temperaturi ce pot ajunge până la 74°C, fără ca prin aceasta calitatea fructelor să fie diminuată.

În Fig. 15 este exemplificată influența dimensiunii produselor asupra duratei de uscare.

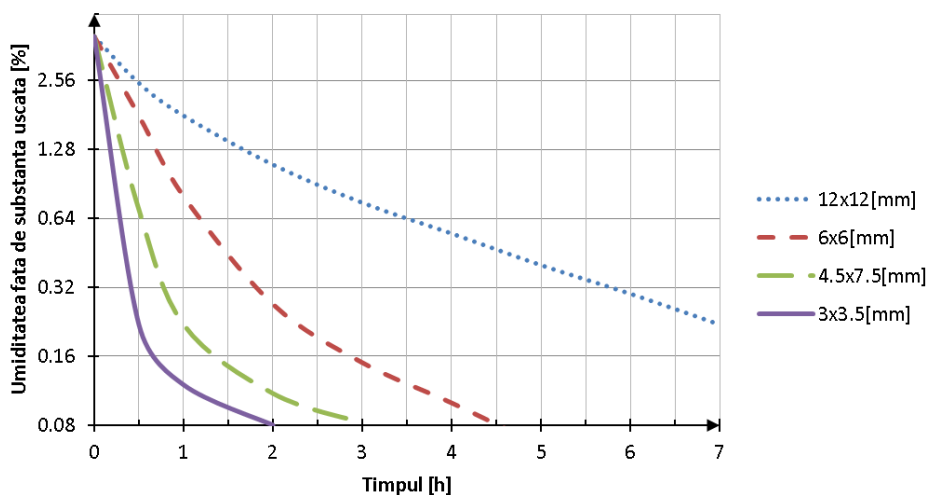


Figura 15 - Influența dimensiunii produselor asupra duratei de uscare

4.3.9 Așezarea grătarelor cu material pe carucioare

Grătarele folosite pentru uscare trebuie să aibă o suprafață cât mai mare de uscare pe unitatea de spațiu ce este ocupată în instalația respectivă. În uscătoarele

tunel grătarele se așează câte 20-30 pe un cărucior, unele sub altele, pe întreaga lățime a utilajului, cu un spațiu de 60-70 mm între două grătare consecutive, pentru ca aerul să treacă ușor printre ele.

Curentul principal de aer trecând printre grătare în direcție orizontală, cu o viteză de cca. 5 m/s, devine intens turbulent. Se crează astfel diferențe de presiune și se produc curenți secundari de aer care trec printre grătarele cu material umed. Așezarea neregulată a grătarelor cu nerespectarea spațiului liber dintre ele, încărcarea neuniformă a materiei prime pe grătare sau într-un strat prea gros, are un efect negativ asupra vitezei de desfășurare a procesului de uscare.

4.3.10 Încărcarea legumelor și fructelor pe gratare sau site

Legumele tăiate în diferite forme sunt așezate pe grătare într-un strat uniform, având o grosime de 12-24 mm. Fac excepție prunele, care se pot așeza pe 1-2 rânduri, într-un strat cu grosimea de până la 30-40 mm. Încărcarea pe m^2 de grătar în mod obișnuit este de 4-20 kg; într-o operație bine condusă, materia primă este așezată într-un strat uniform ca grosime, pe toată suprafața grătarului. Încărcarea materialului pe grătar sau site influențează viteza de uscare și implicit durata procesului. La o încărcare mai mare a grătarelor, peste o anumită limită, randamentul uscătorului nu mai crește, ci din contră, scade.

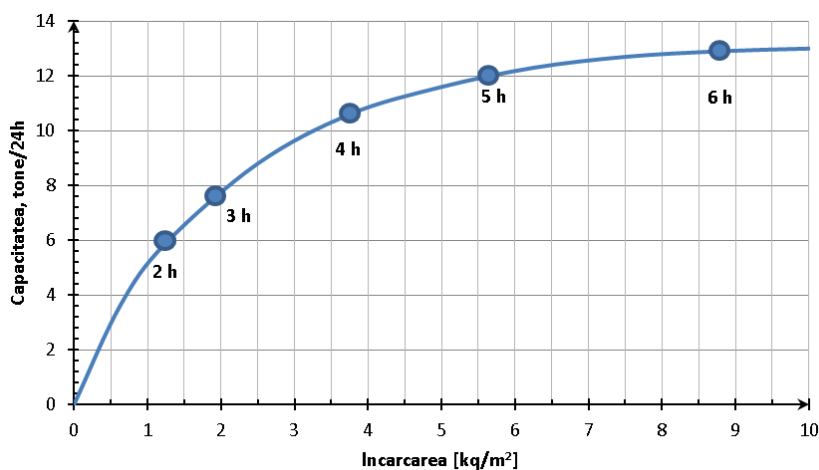


Figura 16 - Influența încărcării grătarelor asupra capacității de lucru a uscătorului tunel

Dimpotrivă, diminuând în mod rațional încărcătura pe site se poate micșora sensibil durata uscării, fără a se reduce însă capacitatea de producție a uscătorului. Aceasta se reflectă printr-o calitate mai bună a produselor, deoarece sunt expuse un timp mai scurt acțiunii căldurii.

Capacitatea unui uscător de tip tunel nu se determină prin cantitatea de materie primă așezată pe suprafața grătarelor, ci prin cantitatea totală de produs uscat care se obține în 24 ore de funcționare neîntreruptă a acestuia.

Durata de uscare mai este influențată și de următorii factori:

- condițiile în care materia primă vine în contact cu aerul: amestecarea materiei prime, contactul mai intim al aerului cald cu materia primă, afânarea stratului de materiale pe grătare etc.;
- tratarea preliminară a materiei prime: opărirea sau aburirea;
- variațiile de temperatură din uscător. Variațiile mici de temperatură sau o temperatură constantă contribuie la o uscare mai uniformă.

4.3.11 Temperatura și umiditatea aerului

Încălzirea aerului cu un anumit conținut de umiditate are ca efect scăderea umidității sale relative. Din acest punct de vedere este indicat să se utilizeze aer la o temperatură cât mai ridicată, deoarece antrenarea apei va fi cu atât mai rapidă cu cât aerul va fi mai uscat. În practică, există totuși o limitare atât a temperaturii (pentru prevenirea caramelizării zaharurilor și a degradării ireversibile a substanțelor proteice) cât și a umidității relative (formarea crustei, care împiedică ulterior difuzia apei, încetinind astfel în final uscarea).

În același timp, dacă temperatura aerului este prea ridicată, la sfârșitul uscării o cantitate mare de căldură este eliminată. O scurtă supraîncălzire a fructelor sau legumelor cu un conținut scăzut de apă, poate duce la denaturarea culorii și aromei.

În general, la uscarea fructelor și legumelor, temperatura aerului la intrarea în tunel este de 62-75°C și umiditatea relativă de 20-25%, iar la ieșire temperatura scade la 40-45°C, în timp ce umiditatea relativă ajunge la 60-65%.

Așa, de exemplu, în cazul uscării cartofilor sub formă de cuburi, la temperatura de 60°C, 70°C și 80°C, în aceleași condiții de încărcare a grătarelor, de viteză a aerului și la o diferență de temperatură constantă între termometrul uscat și cel umed, ritmul inițial de uscare când produsele au o umiditate ridicată (peste 40-50%) este aproape identic pentru toate cele trei curbe. În zona cu umiditate scăzută a produsului, ritmul de uscare este diferențiat, fiind cu mult mai mare la temperaturi mai ridicate (fig. 4).

Pe de altă parte, umiditatea aerului cald este un parametru important al uscării, deoarece influențează în mod nemijlocit viteza procesului, în sensul că în măsura în care umiditatea aerului este mai mică, capacitatea sa de a prelua vaporii rezultați prin evaporare este mai mare, permițând deci trecerea în faza de vaporii a cantității respective de apă din produs. Pentru ca uscarea să nu fie prea rapidă în

prima fază, ceea ce ar avea ca efect formarea structurii cornoase a straturilor superficiale (apariția crustei), aerul cald care vine în contact cu produsul proaspăt trebuie să aibă o umiditate relativă mai mare. În practică, acest lucru se realizează prin recircularea parțială a aerului care a trecut o dată prin uscător și care are o umiditate mai mare decât aerul proaspăt.

Pentru legumele tăiate sub diferite forme, în care caz uscarea se desfășoară în timp relativ scurt, ritmul de uscare este proporțional cu diferența de temperatură dintre termometrul uscat și cel umed. Pentru prune, care necesită o durată mare de uscare, ritmul de uscare este practic independent de temperatura indicată de termometrul umed, dacă umiditatea relativă nu este mai mare de 40%.

În general viteza de uscare este aproximativ proporțională cu temperatura.

Obținerea unor legume și fructe uscate de calitate depinde în mare măsură de modul de reglare al amestecului de aer proaspăt și aer recirculat, amestec ce trebuie determinat în fiecare caz în parte. În afara avantajelor calitative menționate, recircularea parțială a aerului interesează și din punct de vedere al economiei de combustibil, întrucât acesta trebuie să fie încălzit într-o măsură redusă.

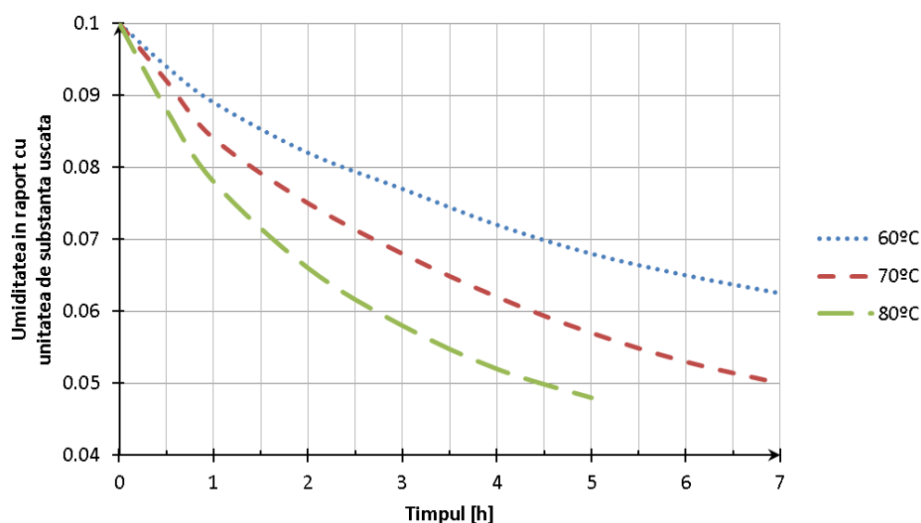


Figura 17 - Influența temperaturii aerului

Instalațiile de uscare utilizate la uscarea legumelor și fructelor lucrează, în majoritatea cazurilor, cu aer recirculat la care se adaugă numai o parte de aer proaspăt. Astfel, s-a stabilit că prin recircularea aerului în timpul uscării prunelor rezultă o economie de combustibil de aproape 50%.

4.3.12 Viteza aerului

În prima fază a uscării, viteza aerului are o influență mare, întrucât pe lângă funcția de agent încălzitor, aerul o are și pe aceea de a prelua și a vehicula vaporii rezultați prin evaporarea umidității. Cu cât viteza de îndepărtare a vaporilor va fi mai mare cu atât se vor crea condiții mai bune pentru ca alte cantități de apă să se evapore de pe suprafața produselor.

În cea de-a doua fază a uscării, când evaporarea apei se produce în interiorul particulelor, viteza aerului are o influență mult mai mică asupra vitezei de uscare.

În practică, pentru uscătoarele tunel s-a stabilit că la viteze mai mari de 5 m/s ale aerului, presiunea statică și puterea necesară cu care trebuie să lucreze ventilatorul devine atât de mare, încât creșterea în plus a vitezei devine neeconomică. Viteza aerului are un efect mai mic asupra uscării fructelor, care necesită durată mai mare de uscare (prune și pere) decât în cazul legumelor tăiate în cuburi și felii, care au o durată de uscare mai mică.

Așa de exemplu, curbele de uscare pentru vitezele de 240 și 300 m/min, sunt aproape identice; oarecare diferențieri se pun în evidență pentru vitezele de 120 și 180 m/minut.

Bucățile mici de legume se usucă mai repede decât cele mari pentru că volumul lor este mai mic față de suprafața de evaporare respectivă și pentru că umiditatea din interiorul particulelor are o distanță mai scurtă de parcurs până la atingerea suprafeței.

Viteza aerului variază foarte mult cu distanța dintre grătare și cu încărcarea lor, care la legume în general nu trebuie să depășească 6-8 kg/m². La o viteză a aerului de 1 m/s uscarea este de două ori mai rapidă decât în aer liniștit, iar la o viteză de 2 m/s viteza procesului este de 3 ori mai mare.

4.3.13 Distribuția aerului

În afara faptului că uscătorul trebuie aprovizionat cu un volum suficient de aer pentru uscare, acesta trebuie să fie distribuit uniform în masa produselor. În mod frecvent o bună parte din cantitatea de aer caută să treacă prin spațiul de deasupra cărucioarelor cu grătare, pe dedesubtul cărucioarelor sau lateral față de cărucioare, în loc să treacă în întregime printre grătare și produse. Prin montarea și reglarea dirijorilor de aer în spațiul de trecere a curentului de aer, din tunelul superior în cel inferior, aerul este forțat să treacă în primul rând printre grătarele cu produse și în același timp este distribuit mai uniform pe toată secțiunea tunelului.

Repartizarea produsului pe grătare trebuie astfel făcută, încât aerul să vină în contact cât mai strâns și cât mai uniform cu întreaga suprafață a particulelor de produs.

4.3.14 Recircularea aerului

Dacă aerul folosit pentru uscarea fructelor și legumelor este lăsat să iasă direct în atmosferă, se pierde foarte multă căldură. Dacă însă aerul se reintroduce în circuit, această căldură va fi în bună parte păstrată. Dimpotrivă, dacă aerul proaspăt este aspirat în uscător, ca să-l înlocuiască pe cel eliminat, este necesar de două ori mai multă căldură pentru a se încălzi.

Anumite fructe supuse unei temperaturi mai mari, sunt suprasolicitate la suprafață și în acest fel uscarea în ansamblu este întârziată. Acest lucru este evitat într-o mare măsură, dacă umiditatea relativă este suficient de mare, lucru ce se poate realiza prin recircularea unei părți din aerul uzat. Din această cauză, la uscătoarele moderne se practică întotdeauna recircularea aerului deja folosit. Așa de exemplu, s-a stabilit că prin recirculația judicioasă a aerului la uscarea prunelor, se realizează o economie de combustibil de aproape 50%.

4.3.15 Temperatura produsului în timpul procesului de uscare

În decursul uscării este necesar ca temperatura produsului să nu depășească 62-75°C, sensibilitatea la temperatură diferind cu natura acestuia. Pentru realizarea corectă a procesului de uscare temperatura produsului trebuie menținută între anumite limite. Micșorarea temperaturii sub o anumită valoare scade mult viteza uscării, iar creșterea peste o anumită limită duce la degradări calitative: brunarea, carbonizarea, caramelizarea zaharurilor, pierderi de substanțe nutritive, scăderea capacității de rehidratare, ca rezultat al unor reacții chimice complexe ce au loc în produs.

Dacă temperatura produsului s-ar menține în decursul uscării la valori în jur de 37°C s-ar putea produce alterări de natură microbiologică înainte ca procesul de uscare să se încheie.

Pe baza experienței practice se poate considera că în cursul uscării, limitele superioare de temperatură ale aerului cald sunt de 70-72°C. La finele uscării, temperatura produsului se apropie de cea a aerului (fig. 6), deoarece așa cum se știe, numai în prima perioadă de uscare temperatura produsului este egală cu temperatura indicată de termometrul umed.

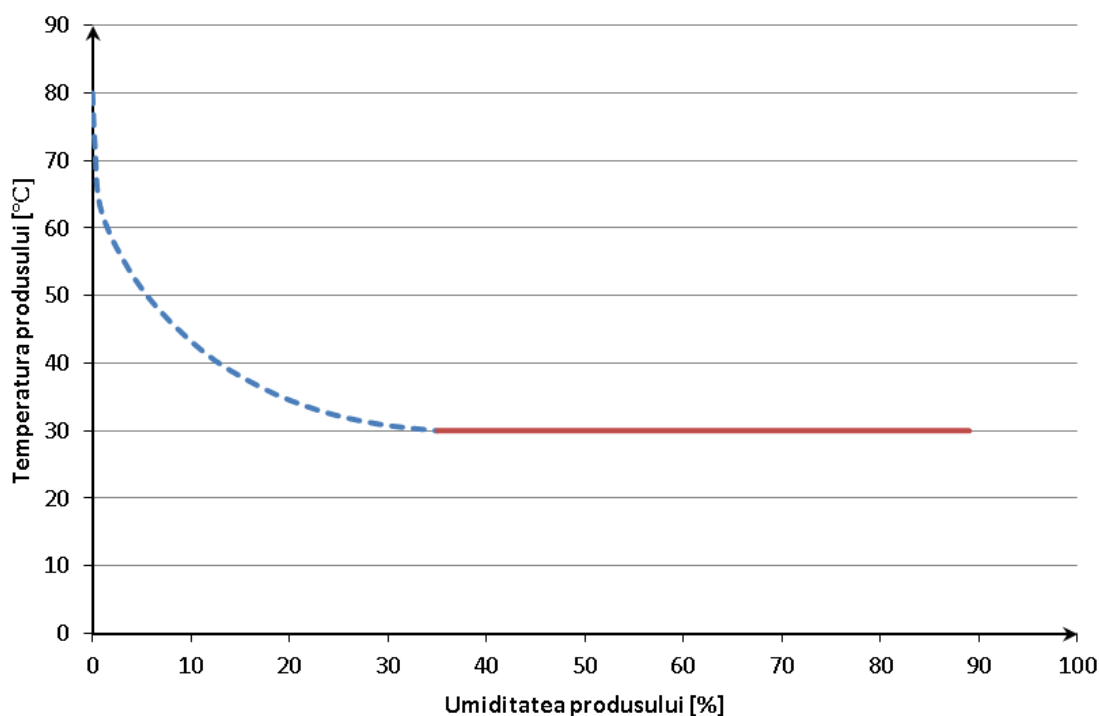


Figura 18 - Variația temperaturii produsului în funcție de umiditate în timpul uscării

La începutul procesului de uscare a legumelor, respectiv în prima parte a fazei a doua (perioada de uscare cu viteză constantă), creșterea temperaturii aerului nu prezintă nici un pericol, deoarece în acest caz temperatura produsului corespunde temperaturii de saturație la presiunea parțială de vapori a aerului.

Cu cât uscarea înaintează, presiunea vaporilor de apă de la suprafața produsului devine mai mică decât cea de saturație și temperatura produsului crește. Pentru a se evita creșterea temperaturii produsului peste limitele indicate, respectiv degradarea lui, este necesară reducerea temperaturii agentului de uscare în ultima perioadă a procesului.

În fig. 7 se arată variația în timp a temperaturii cartofilor tăiați sub formă de cuburi și a aerului într-un tunel cu contracurent, în condițiile: încărcarea ușoară cu $2,5 \text{ kg/m}^2$, tunelul cu 12 cărucioare, fiecare având o suprafață de cca 40 m^2 . Viteza aerului între grătare la ieșirea din tunel este de 6 m/s , temperatura termometrului umed este de 30°C și a celui uscat este de 65°C . Timpul de uscare pentru cartofi cu un conținut de 6% umiditate este de 7 ore.

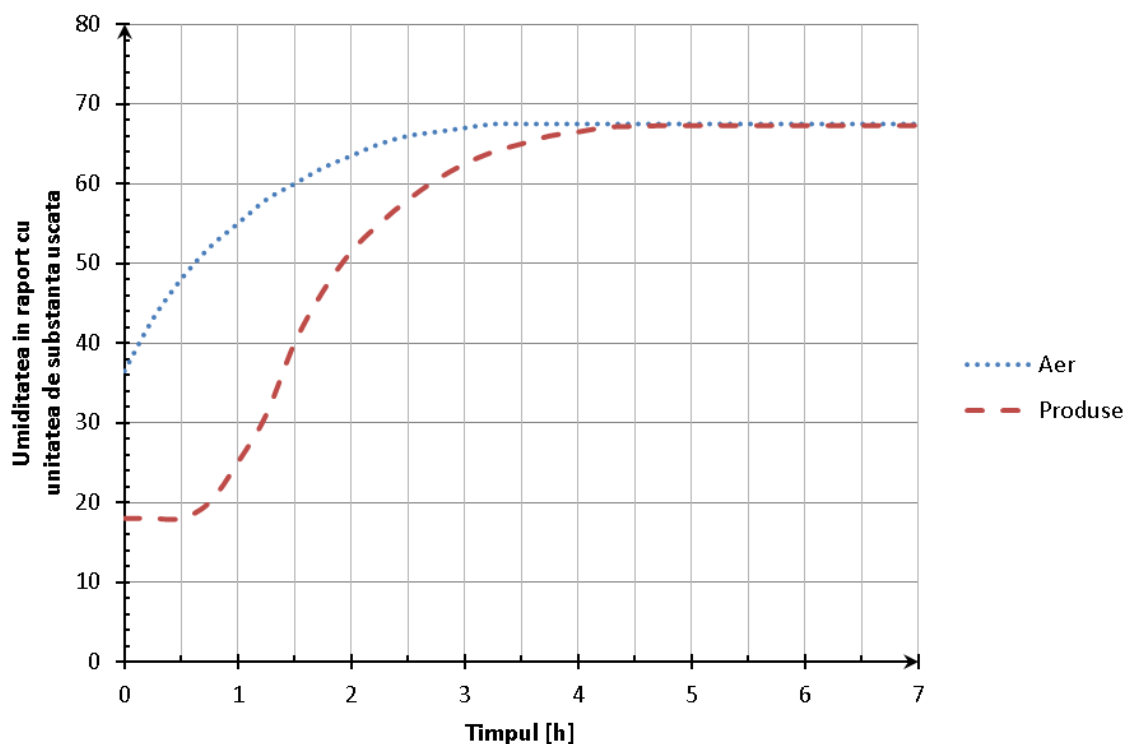


Figura 19 - Variația în timp a temperaturii aerului și cartofilor într-un uscator tip tunel în contracurent

În fig. 8 și fig. 9 se arată variația conținutului de apă în funcție de durata uscării și variația temperaturii aerului în tunel. Se constată că în cazul cartofilor, în primele trei ore se evaporă cca 80% din apă, iar în următoarele trei ore se evaporă numai câte 6-8% pe oră.

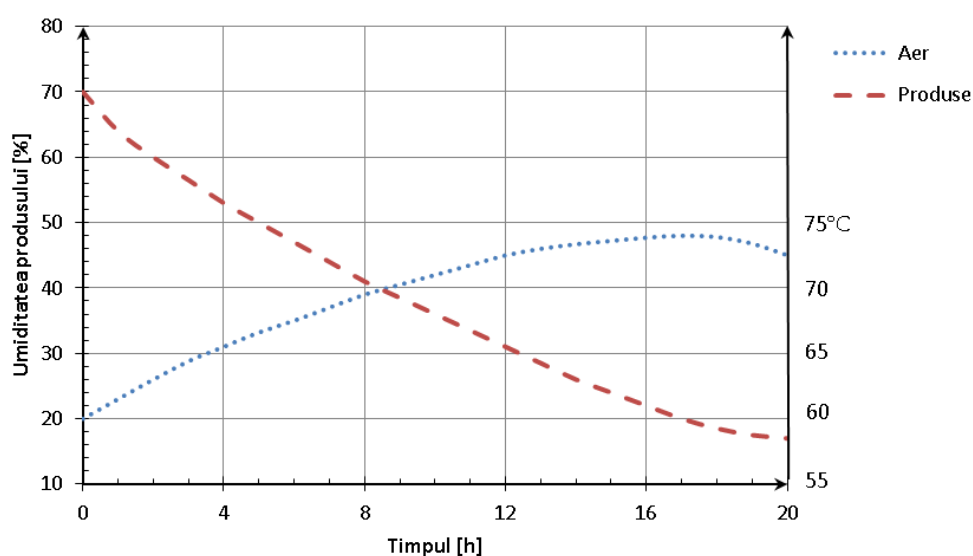


Figura 20 - Variația conținutului de apă și a temperaturii în funcție de durata uscării în uscatorul tip tunel în contracurent la uscarea prunelor

Variația conținutului final de apă este influențată de: natura și compoziția chimică a produsului, temperatura aerului de uscare, viteza aerului cald, umiditatea relativă etc.

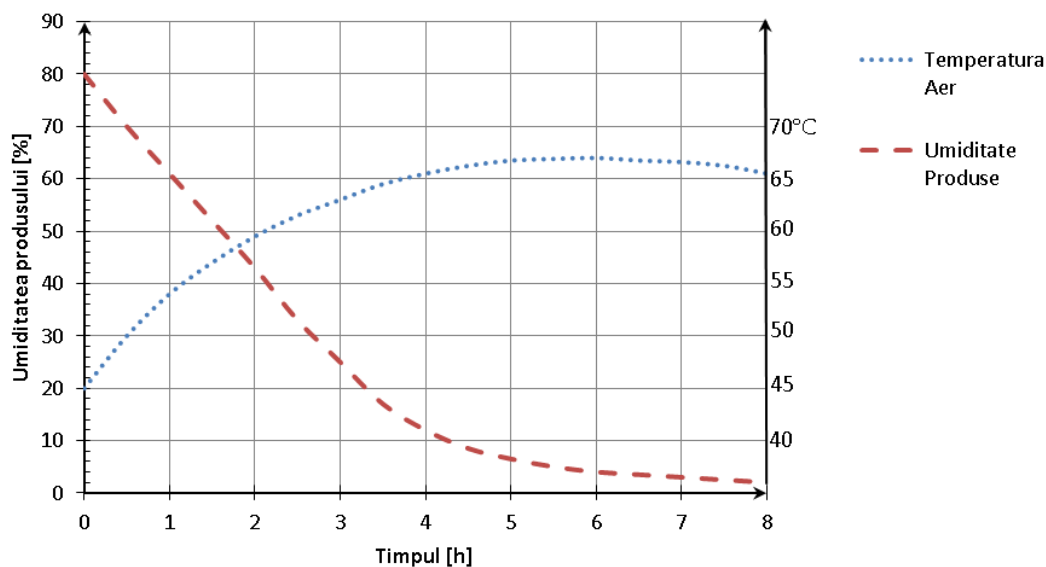


Figura 21 - Variația conținutului de apă și a temperaturii în funcție de durata uscării în uscatorul tip tunel în contracurent la uscarea cartofilor

Reprezentarea grafică, în ansamblu, a procesului de uscare, respectiv variația umidității, a temperaturii produsului și a vitezei de uscare este dată în fig. 10.

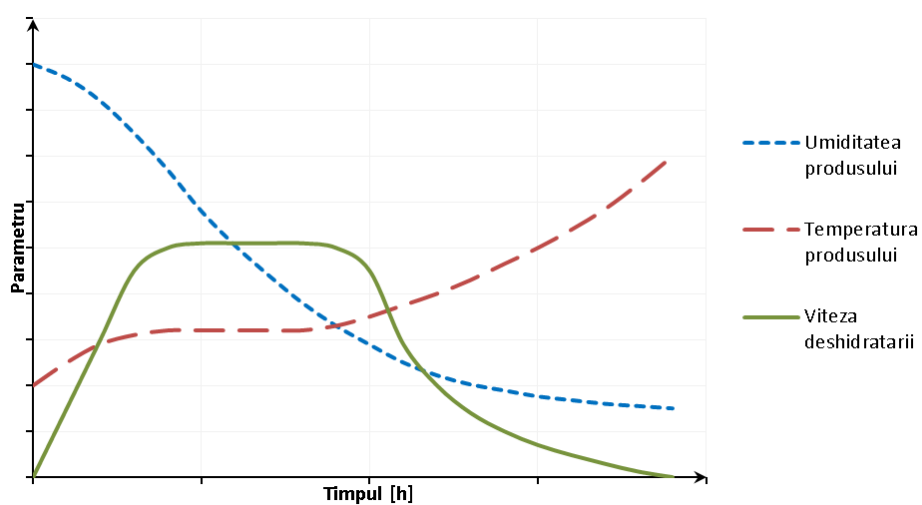


Figura 22 - Variația umidității produsului, temperaturii produsului și vitezei uscării în funcție de timp

4.3.16 Conținutul final de apă al produselor uscate

Multă vreme s-a crezut că uscarea legumelor până la o umiditate de 10-12%, asigură atât calitatea cât și buna lor păstrare timp de 8-10 luni. Lucrările executate în ultimii ani au arătat că legumele trebuie uscate la o umiditate mai joasă, sub 5%, pentru a putea satisface integral cerințele de mai sus. La fructe s-a menținut multă vreme valoarea 25% drept limita superioară a umidității finale; azi această limită a fost redusă pentru multe specii de fructe, în funcție de compoziția lor chimică și, în special de conținutul lor de zaharuri. La prune limita de 25% umiditate s-a păstrat.

Conținutul redus de apă asigură o comportare mai bună din punct de vedere microbiologic și împiedică reacțiile chimice nedorite (oxidări, decolorări, brunificări neenzimatică, etc.) în timpul păstrării produselor uscate. Fenomenele enzimatice nu sunt însă inhibitate prin această reducere a conținutului de apă.

Adăugarea unui agent desicant (clorură de calciu, oxid de calciu, silicagel) în recipiente care conțin legume deshidratate face posibilă reducerea umidității reziduale până la un nivel atât de scăzut, încât produsul nu mai este supus brunificărilor.

Intensitatea brunificărilor neenzimatică este proporțională cu concentrația substanțelor active. În consecință prin uscare, crescând concentrația în substanțe active, intensitatea brunificărilor neenzimatică ar trebui să crească. Această regulă este însă valabilă numai în cazul când produsul conține o limită minimă de apă.



Figura 23 - Rosii sferturi uscate

4.3.17 Principiile uscării legumelor și fructelor

Uscarea fructelor și legumelor este procesul tehnologic prin care se reduce conținutul natural de apă până la o anumită limită, care să împiedice activitatea microorganismelor, fără a se distruge țesuturile sau a se deprecia valoarea alimentară a produselor ce se usuca.

Ansamblul de procese ce se petrec în timpul uscării duce la concentrarea substanțelor, la reducerea volumului materiei prime folosite și la sporirea valorii alimentare și deci comerciale a produsului finit. Fructele și legumele uscate trebuie să mențină însușirile calitative, îndeosebi culoarea, gustul, aspectul și componenții nutritivi ai produselor proaspete.

Îndepărtarea excesului de apă din fructe și legume, proces numit uscare, se poate face fie cu ajutorul căldurii solare – uscarea naturală – fie cu ajutorul căldurii obținute pe cale artificială (gaze de ardere, aer cald, suprafețe încălzite etc.) – uscarea artificială. Excesul de apă ce trebuie îndepărtat prin uscare variază în funcție de natura materiei prime, precum și în funcție de durata de păstrare a produsului finit.

Legumele și fructele uscate se conservă în bune condiții timp de 8-12 luni, greutatea lor se reduce în medie la a 10-a parte și necesită un spațiu mult mai mic de depozitare față de produsele proaspete și de asemenea necesită cheltuieli de transport, depozitare și manipulare mai reduse. Fructele și legumele proaspete conțin aproximativ 85-96% apă, pe când umiditatea maximă a produsului finit este de cca. 10-25%, stabilită în funcție de destinația acestuia.

Apa se înlătură treptat, parțial și nu brusc, deoarece în acest caz se înregistrează degradări calitative ireversibile. De altfel uscarea totală este inutilă, deoarece fructele complet uscate absorb puțin câte puțin apa din atmosfera înconjurătoare, în final ajungând la un conținut în apă de cca. 16%.

4.3.18 Estimarea costului procesului de uscare

Costul energiei consumate de procesul de uscare se poate estima însumând consumul de energie termică și consumul de energie electrică ale utilajului.

4.3.18.1 Costul cu energia electrică

Consumul electric este reprezentat de energia electrică consumată de sistemele de ventilație și automatizare. Pentru utilajele de uscare se poate lua în considerare o putere necesară automatizării procesului de uscare, formată din puterea ventilatorului/ventilatoarelor și puterea necesară sistemului de automatizare pentru fiecare modul care conține un ventilator (servomotoare, sigurantă, relee, calculator, care este de aprox. 0,2kw). În cazul utilajelor cu mai

multe ventilatoare se inmulteste numarul de ventilatoare cu puterea necesara sistemului de automatizare. Deci pentru un calcul aproximativ al **consumului de curent electric maxim** vom avea urmatoarea formula pentru calculul puterii electrice:

$$P_{\text{electrica}} = N_{\text{ventilatoare}} \times P_{\text{automatizare}}$$

Formula calcul putere electrica

Consumul de energie electrica va fi egal cu puterea totala consumata inmultita cu durata unui proces:

$$E_{\text{electrica}} = P_{\text{electrica}} \times t_{\text{proces}}$$

Energia electrica consumata

Pentru calculul costului cu energia electrica se inmulteste energia electrica consumata de un proces cu costul unei unitati ale acesteia (pretul curentului electric / kwh).

$$Cost_{\text{energie electrica}} = E_{\text{electrica}} \times Pret_{\text{unitar}}$$

Costul cu energia electrica

4.3.18.2 Costul cu energia termica

Energia termica consumata de procesul de uscare este suma energiilor: energia necesara pentru vaporizarea apei, energia eliminata in atmosfera odata cu evacuarea aerului umed si energia pierduta din cauza pierderilor termice ale utilajului.

In urma testelor realizate pe utilajele de uscare, energia termica totala consumata este in medie de aproximativ **2kwh pentru fiecare kg de apa vaporizata** din produse, aceasta incluzand si pierderile mentionate.

Pentru calculul energiei termice consumate de un proces de uscare se va inmulti valoarea energiei consumate de fiecare kg de apa vaporizat cu cantitatea de apa vaporizata (in kg, nu in litri):

$$Q_{\text{termica}}[kwh] = Q_{\text{unitar}}\left[\frac{kwh}{kg}\right] \times m[kg]$$

Costul cu energia termica este dependent de cantitatea de produse supuse procesului de uscare si a cantitatii de apa care va fi eliminata din acestea.

$$Cost_{\text{energie termica}} = Q_{\text{termica}} \times Pret_{\text{unitar}}$$

4.3.18.3 Costul total

Tinand cont de costurile energiilor calculate mai sus, costul total cu energia consumata de procesul de uscare va fi astfel:

$$Cost_{total\ energie} = Cost_{energie\ electrica} + Cost_{energie\ termica}$$

4.3.19 Productivitatea uscatoarelor

In functie de cantitatea de produse proaspete sau uscate se va dimensiona suprafata tavilor pe care acestea sunt asezate in vederea uscarii. In cazul in care cu ajutorul aceluasi utilaj se vor usca mai multe tipuri de produse, bineinteles in procese diferite, spre exemplu mere feliate si prune intregi, se va alege valoarea cea mai putin avantajoasa, aceasta fiind pentru mere, deoarece masa acestora raportata la suprafata este mai mica, acestea ocupand o suprafata mai mare, astfel putand acomoda cantitatea ceruta de mere dar si pe cea de prune, pentru prune totusi utilajul fiind usor supradimensionat.

In cazul in care nu sunt disponibile date despre produsele supuse procesului de uscare, se aseaza pe o suprafata de 1 metru patrat produsele pe un singur strat si apoi se cantaresc. Este important ca produsele sa nu se suprapuna sau sa fie inghesuite. Aerul, in majoritatea utilajelor va circula paralel cu suprafata de uscare, astfel suprafata fructelor trebuie sa permita transferul umiditatii catre aer. In cazul utilajelor in care aerul circula perpendicular pe suprafata de uscare, spatiul intre produse va fi mai mare pentru a permite o circulatie adecvata si pentru a asigura o viteza suficienta pentru toate sertarele utilajului. In general producatorii de astfel de utilaje vor prezenta date sau fotografii din care va puteti face o idee privind asezarea produselor. In cazul acestor utilaje trebuie respectat spatiul dintre produse, altfel vor apare diferente mari de umiditate intre produsele aflate in apropierea sursei de caldura si cele din partea opusa, caz in care tot procesul va fi compromis.

Dupa alegerea cantitatii de produse raportata la suprafata, se poate calcula cantitatea de tavi necesara si se pot estima dimensiunile utilajului. Spre exemplu daca avem de uscat 100 kg de merele feliate, vom aseza 5 kg pe metru patrat, deci avem nevoie de 20 de tavi. In general, in industria alimentara se vor utiliza tavi standardizate in asa fel incat sa poata fi usor manevrate de catre personal. Astfel cea mai des utilizata dimensiune in industria alimentara este cea de 600 x 400mm. Aceasta tava are o suprafata de 0.24 . Pentru exemplul nostru, pentru a aseza in vederea uscarii cele 100 kg de mere feliate vom avea nevoie de ~83 tavi. Vom rotunji aceasta valoare la valoarea imediat urmatoare oferita de catre producator.

Fiecare producator poate avea alta dimensiune de tava dar trebuie sa tinem cont ca in cadrul procesului tehnologic este posibil sa ne lovim de cazuri in care avem utilaje alimentare care accepta dimensiunea standard si ne va fi greu sa integram un utilaj cu alte dimensiuni in fluxul tehnologic. De asemenea o dimensiune prea mare a unei tavi va ridica probleme din punctul de vedere al manevrării si transportului de-a lungul fluxului tehnologic. O dimensiune prea mica a tavilor va creea o densitate prea mare de tavi in interiorul utilajului de uscare, lucru care poate impiedica curgerea aerului sau reduce randamentul din cauza cantitatii mai mari de material care trebuie incalzit (ramele tavilor, sinele pe care culiseaza etc.).

4.3.20 Analiza sistemului și performanța uscătoarelor solare

În comparație cu tehnicile convenționale de uscare, uscarea solară este rentabilă și ecologică. Ca o „abordare ecologică”, uscătoarele solare contribuie la procesarea durabilă a alimentelor cu o cantitate redusă CO₂ emisii, spre deosebire de mai multe uscătoare electrice convenționale, care sunt caracteristice amprentei mari de carbon. În lucrări recente, [El Hage et al. \(2018\)](#) au raportat o investigație privind evaluarea economică și de mediu a uscătoarelor solare. Mai mult, într-un alt studiu recent, [Ortiz-Rodriguez et al. \(2020\)](#) au raportat analiza termică și energetică a unui uscător hibrid solar-GPL de tip pentru mărfuri agricole. Unitatea a fost construită în Mexic, iar studiul a implicat analiza fezabilității uscării în condiții climatice regionale. Instalația hibridă de GPL integrată solară cuprinde un sistem de încălzire directă a aerului, un sistem de încălzire indirectă a aerului și un sistem convențional de rezervă de energie. Uscarea nopalului folosind sistemul hibrid ar putea aduce o reducere de 75% a umidității cu 80% fracție solară obținută din sistemele de încălzire directă și indirectă. Uscătorul a avut o perioadă de amortizare de 28 și 68 de luni cu sistemele de încălzire directă și, respectiv, indirectă a aerului. Constatările acestui studiu au evidențiat aplicabilitatea uscătoarelor solare hibride pentru uscarea pe scară largă a materialelor alimentare, cu economii substanțiale de energie și beneficii de mediu.

Un uscător solar bine proiectat poate oferi caracteristici de uscare îmbunătățite cu transfer îmbunătățit de căldură și masă. Eficiența uscătoarelor solare poate fi îmbunătățită prin utilizarea colectoarelor ondulate și rugoase cu o suprafață mare (pentru a oferi un coeficient de transfer de căldură mai mare și efecte de turbulență îmbunătățite), ventilatoare și ventilatoare fotovoltaice-termice (pentru a reduce costurile operaționale fără a compromite eficiența de lucru), colectoare solare de aer cu trecere dublă sau triplă (pentru a accelera ratele de uscare), și sisteme de stocare termică care utilizează unități de încălzire latente

sau sensibile pentru operațiuni de uscare neintermitentă. În esență, selecția componentelor ia în considerare și fezabilitatea și aplicabilitatea.

4.3.21 Bilantul energetic

Procesul de uscare implică transferul simultan de căldură și masă. În uscătoarele solare, transferul de căldură poate avea loc prin conducție, convecție și/sau radiație. Bilanțul energetic general al unui produs, atunci când este supus uscării solare, poate fi dat folosind Ec. (1) (Prakash și Kumar, 2017). Aici, termenul din partea stângă reprezintă rata de energie termică câștigată de produsul uscat, iar termenii din partea dreaptă iau în considerare efectele radiației solare absorbite, pierderile de căldură convective, pierderile de căldură datorate evaporării umidității și pierderile de căldură prin radiație.

$$\frac{d(mc_p T)}{dt} = \alpha A_p I(t) - h A_s (T - T_a) - \frac{d(\lambda m_w)}{dt} - A_s \varepsilon \sigma F (T^4 - T_a^4)$$

unde m este masa produsului (kg); cp este căldura specifică a produsului (kJ/kgK); T și Tun sunt temperatura produsului și a aerului (K); Unp și Uns sunt suprafața proiectată și suprafața produsului (m²), Eu(t) este densitatea fluxului de radiații în timpul zilei, α și ε este absorbția și emisivitatea radiației solare și h este coeficientul de transfer termic convectiv (W/m²K).

În mod similar, ecuația de transfer de masă pentru uscarea solară poate fi dată folosind Ec. (2), luând în considerare a doua lege a lui Fick (Kouhila et al., 2020).

$$\frac{\partial M_{r,t}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D \frac{\partial M}{\partial r} \right)$$

unde M este conținutul de umiditate (kg de apă/kg de substanță uscată, d.b.), t este ora (timpul), r este poziția radială (m) și D este difuzivitatea umidității (m²/s).

4.3.22 Cinetica de uscare

Conținutul de umiditate al materialului alimentar este un factor critic care se referă la termenul de valabilitate al produsului final (Yoha et al., 2020). Conținutul de umiditate al probelor în timpul perioadei de uscare poate fi estimat folosind ec. (3). (3)

$$M = \frac{m_t - m_d}{m_d}$$

unde m_t și m_d sunt masa probelor la momentul "t" și masa uscată a probei (kg). Raportul de umiditate (DOMN) din eșantion poate fi administrat folosind Ec. (4) (Moradi et al., 2020).(4)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}$$

unde M_0 , M_t și M_{eq} sunt conținutul de umiditate în stadiul inițial, oricând "t" și stadiul de echilibru. Viteza de uscare este o funcție a modificării conținutului de umiditate (dM) cu schimbarea timpului (dt) și este dată de Ec. (5).(5)

$$Drying\ rate = \frac{dM}{dt}$$

4.3.23 Eficiența termică

Eficiența termică a colectorului solar (η_c) poate fi definit ca raportul dintre cantitatea de energie care a fost utilizată din energia incidentă totală de pe placa colectoare și este dat de Ec. (6) (Ortiz-Rodriguez et al., 2020).(6)

$$\eta_c = \frac{m_a c_p (T_{c0} - T_{ci})}{I_c A_c}$$

unde m este debitul masic de aer (kg/s); c_p este căldura specifică a aerului (J/kg K); T_{c0} și T_{ci} sunt temperaturile de ieșire și de intrare ale colectorului (K); E_{uc} este cantitatea de energie solară din colector (W/m^2) și U_{nc} este zona colectorului (m^2).

4.3.24 Performanța generală a sistemului

Eficiența generală de uscare (η_d) reprezintă cantitatea de energie utilizată pentru a evapora umiditatea (Ec. (7)) (Aymen et al., 2019).(7)

$$\eta_d = \frac{m_w L_h}{I A_c t + I A_g t + E_f}$$

unde m_w este masa apei evaporate din produs (kg); L_h este căldura latentă de vaporizare a apei (J/kg); E_{uUnct} și E_{uUngt} sunt energia solară de intrare pe colector și camera de uscare (seră) (J) și E_f este necesarul de energie al ventilatorului (J).

Având în vedere aceste aspecte, Aymen et al. (2019) au dezvoltat un uscător solar de seră de tip mixt și au studiat aplicabilitatea acestuia pentru uscarea feliilor de ardei roșu. Uscătorul dezvoltat a constatat dintr-un colector cu placă plată

(izolator, absorbant și capac de sticlă) și a proiectat special o cameră de uscare în formă de capelă pentru performanțe îmbunătățite. Rezultatele au confirmat că uscătorul dezvoltat ar putea reduce timpul de uscare cu aproximativ 7 ore. Eficiența maximă și minimă a colectorului solar a fost de 88% și, respectiv, 30%, la un debit de aer de 0,047 kg/s. Dintre gama de modele folosite, modelul modificat Henderson și Pabis a arătat cea mai bună potrivire pentru a explica cinetica de uscare a ardeului roșu. Eficiența energetică generală s-a dovedit a fi de 34% și a fost raportată o perioadă estimată de recuperare a investiției de 1,02 ani.

Fudholi et al. (2015) au rezumat eficiența performanței uscătoarelor solare și le-au comparat cu sistemele de uscare la soare deschis în ceea ce privește eficiența de uscare, timpul de uscare și capacitatea de evaporare a apei. Studiul a dedus că sistemele de uscare solară sunt rentabile, iar colectoarele solare au facilitat păstrarea atributelor de calitate ale materiilor alimentare, spre deosebire de cazul uscării la soare deschis. De asemenea, sistemul de uscare solară ar putea aduce economii de aproximativ 13 până la 86% în timpul de uscare. În ceea ce privește eficiența performanței, sistemul de uscare solară a prezentat 39%, 27% și 41% din eficiența termică, capacitatea sistemului de uscare și eficiența de preluare, cu un consum mediu specific de energie de 2,37 kWh/kg. Sistemul de uscare a fost analizat folosind potențialul de îmbunătățire a indicatorului exergetic (IP), care s-a dovedit a varia de la 47 la 247 W. Mai mult, a fost raportată o perioadă medie de recuperare a investiției de 2,6 ani.

4.4 Fazele uscării

Pentru cazurile în care utilajul de uscare nu este dotat cu un sistem de automatizare performant, parametri aerului trebuie să aleasă cu mare atenție. Acești parametri influențează atât calitatea produsului cât și eficiența procesului de uscare. În funcție de fază în care se afla procesul de uscare parametri aerului (temperatura, umiditatea și viteza) se aleg după algoritmi diferiți.

4.4.1 Faza de Incalzire

În faza de încălzire toată căldura va fi transferată produselor. Astfel pentru a transfera aportul de căldură către produse, atmosfera trebuie să fie saturată sau presiunea parțială a vaporilor de apă la suprafața produselor să fie egală cu presiunea parțială a vaporilor de apă din aer, astfel procesul de uscare este oprit și toată căldura este transferată produselor. Pe parcursul acestei faze temperatura produselor va crește treptat până va ajunge aproape egală cu temperatura aerului. Din acest motiv temperatura acestei faze trebuie să nu depășească temperatura

care duce la deteriorarea produselor. De exemplu in cazul catinei aceasta temperatura este de 40 °C.

*In cazul fructelor si legumelor, aceasta faza trebuie sa fie cat mai scurta deoarece viteza de vaporizare este foarte mare si se produce condens pe peretii utilajelor.

4.4.2 Faza de Conditionare

Faza de conditionare este utilizata in general produselor care prezinta riscul formarii de cruste sau in cazul produselor care au o umiditate scazuta la exterior, pentru egalizarea umiditatii in intreg produsul, pentru a facilita desfasurarea procesului de uscare.

Aceasta faza este in general aplicata la uscarea cherestelei, dar poate fi aplicata si in cazul unor fructe. In aceasta faza se mentine o temperatura constanta iar umiditatea este reglata in asa fel incat sa se produca o umezire a produselor. Temperatura din aceasta faza trebuie aleasa in asa fel incat sa nu influenteze negativ calitatea produsului, la fel ca in faza de incalzire.

4.4.3 Faza de Uscare

Aceasta faza reprezinta cel mai important interval din intreg procesul. Deplasarea apei dinspre zonele produselor cu o umiditate mai mare catre zonele cu o umiditate mai scazuta se numeste difuzie. Vaporizarea apei de pe suprafata produselor are loc cu o anumita viteza care trebuie sa fie egala cu viteza difuziei pentru a evita fenomenul de scorjire. Daca viteza de vaporizare este mai mare decat viteza difuziei atunci suprafata produselor ramane fara umiditate si temperatura acesteia va creste, lucru care poate duce la formarea crustelor care impiedica uscarea. Pentru sistemele care nu pot calcula automat viteza de uscare si sa stabileasca parametri optimi, alegerea acestora este foarte dificila. Mai mult, datorita modificarilor fizico-chimice a produselor in timpul uscarii, acesti parametri variaza chiar in cadrul aceluiasi proces.

Avantajul sistemului de automatizare este ca acesti parametri sunt calculati automat, astfel procesul de uscare se desfasoara in conditii optime.

4.4.4 Faza de Egalizare

Dupa incheierea procesului de uscare, in anumite conditii se poate aplica o faza de egalizare in care produsele se supun unui tratament termic la umiditate scazuta care are ca scop inchiderea porilor pentru evitarea rehidratarii. Acest proces este recomandat pentru produsele poroase uscate in perioadele calde si umede.

4.4.5 Faza de Racire

Faza de racire se desfasoara in general prin evacuarea aerului cald prin controlul clapetelor. In cazul in care racirea trebuie controlata cu precizie, se practica si controlul incalzirii pentru mentinerea unui gradient. Umiditatea nu este controlata.

4.5 Retete pentru uscarea fructelor si legumelor

Durata procesului de uscare este influentata de mai multi factori dar cei mai importanti factori sunt tipul si forma produsului supus uscarii si temperatura. Cand vom compara doua utilaje pentru uscare, timpul in care se executa procesul trebuie sa fie dat pentru acelasi produs si aceeaasi forma de prezentare a acestuia, altfel comparatia nu are rost. Pentru a lamuri lucrurile sa luam de exemplu prunei intrega si prunei rupta in jumatati. Timpul de uscare al unei prune intregi este cuprins intre 24 si 30 de ore, iar al unei jumatati este cuprins intre 12 si 15 ore, in ambele cazuri fiind utilizat acelasi utilaj si aceeaasi temperatura de uscare. Un alt exemplu este al feliilor de mar care se usuca in 6-7 ore. Producatorul utilajului trebuie sa va spuna pentru ce produs si mod de prezentare este timpul pe care vi-l comunica.

Reteta de uscare a unui produs contine mai multe faze si fiecare faza poate contine mai multi pasi. Principalele faze ale procesului de uscare sunt: incalzirea (A-B) produselor, uscarea propriu-zisa (B-E) si racirea (E-F). In faza de uscare pot exista mai multe trepte ale parametrilor programati.

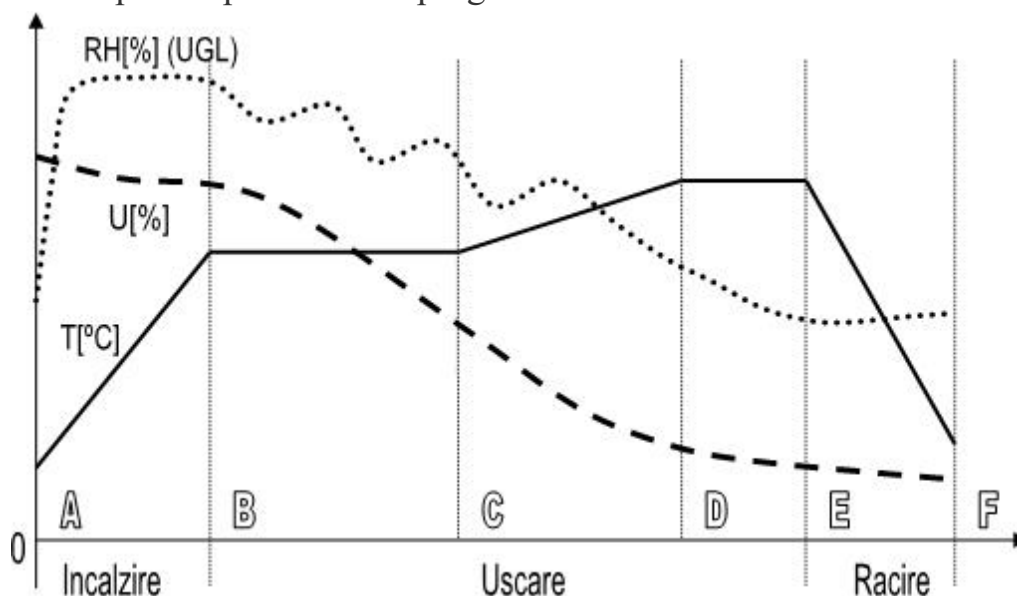


Figura 24 - Fazele uscarii

In tabelele urmatoare sunt prezentate date adunate din diverse materiale studiate cat si din experimente efectuate [6, 8, 12, 13].

4.5.1 Retete pentru fructe

Nr. Crt.	Denumire	Durata [h]	Temperatura	Umiditate finala	Densitate kg/mp
1	Caise	18...24	45...50 / 55...65	15	4...5 (jumatati)
2	Cirese si visine	6...10	45...55 / 65...72	6...12	6...8 respectiv 8...10
3	Piersici	6...12	55...60	16	5...6
4	Prune	24...30	50...55 / 70...75	22...24	10
5	Struguri	12...20	50...55 / max. 70	13...20	8...10
6	Mere felii	6...10	50...60 / 70...72	5-12	6
7	Pere felii	5...9	45...50 / 65...70	10...12	13
8	Gutui felii	6...8	65...70	22	10
9	Banane felii	6...8	70	5-15	4...6
10	Capsuni	5...8	50...60	9-12	7...8

4.5.2 Retete pentru legume

Nr. Crt.	Denumire	Durata	Temperatura	Umiditate finala	Densitate kg/mp
1	Mazare boabe	8...10	50...57	5...6 / 15...20	4...5
2	Fasole verde pastai	8...12	5...65	6...8	(3...5) 6...7

3	Spanac	4...5	55...60	5...6	1...2
4	Plante condimentare	1...2	55...60	2...5	1.5...2
5	Rosii	10...12	60...62	5...8	2...3 (feli 6mm)
6	Vinete	6...8	55...62	5...6	5...6
7	Ardei	3...5	62...70	Max. 8	6
8	Ceapa	3...6	(50) 62	4...6	6...7 (8)
9	Prazul	4	55...60	5...8	6...7
10	Varza alba si rosie, conopida	5...6	60-62	6...7	5...6
11	Morcovii	3...4	70	6...10	8
12	Telina si pantrunjel	1...3	52...60	3...10	6...7
13	Pastarnac	1...2	60...65	4...12	6...7
14	Cartofii	5...8	72...80	6...7 (10...14)	8...9
15	Ciupercile	4-18	50-60...65	<6	1...3
16	Usturoi	6...8	55	5	2...4

Capitolul 5 - Principiile de bază folosite într-un uscător solar

Uscătorul solar este un concept relativ simplu. O caracteristică importantă a dispozitivelor de uscare solară este dimensiunea colectoarelor solare. În funcție de cantitatea de mărfuri de uscat, colectoarele trebuie să aibă capacitatea de a furniza cantități suficiente de aer cald în camera de uscare. Colectatorii care sunt prea mici proporțional cu cantitatea de alimente care trebuie uscate vor avea ca rezultat încercări eșuate și alimente stricate.

Principiile de bază folosite într-un uscător solar sunt:

- Transformarea luminii în căldură: orice negru din interiorul unui uscător solar va îmbunătăți eficiența transformării luminii în căldură.
- Captarea căldurii: Izolarea aerului din interiorul uscătorului de aerul din exteriorul uscătorului face o diferență importantă. Folosirea unui solid transparent, cum ar fi o pungă de plastic sau un capac de sticlă, va permite luminii să pătrundă, dar odată ce lumina este absorbită și transformată în căldură, o pungă de plastic sau un capac de sticlă va reține căldura în interior. Acest lucru face posibilă atingerea unor temperaturi similare în zilele reci și cu vânt ca și în zilele caniculare.
- Mutarea căldurii către mâncare. Atât uscătorul cu convecție naturală, cât și uscătorul cu convecție forțată folosesc convecția aerului încălzit pentru a transfera căldura către alimente.

În principal, uscătoarele solare pot fi clasificate în trei grupuri:

5.1 Uscătoare cu convecție naturală

Uscătoare solare care utilizează convecția verticală naturală care apare atunci când aerul este încălzit. În general, uscătoarele cu convecție naturală sunt dimensionate adecvat pentru utilizarea în fermă. Structura este formată din trei componente principale: un colector solar, un recipient de uscare și un coș de evacuare. Uscătoarele naturale convenționale mai mici sunt practic cutii de lemn cu orificii de ventilație în partea de sus și de jos. Alimentele sunt plasate pe rame în interiorul cutiilor. Un încălzitor solar de aer dimensionat corespunzător, cu geam din plastic orientat spre sud și un absorbant de metal negru este conectat la partea inferioară a cutiilor. Aerul intră în partea de jos a încălzitorului solar de aer și este încălzit de absorbantul de metal negru. Aerul cald se ridică pe lângă alimente și iese prin orificiile de ventilație din partea de sus. În timpul funcționării, aceste uscătoare produc temperaturi de 130–180 ° F (50–80 ° C), ceea ce este un interval de dorit pentru majoritatea uscării alimentelor și pentru pasteurizare. Cu aceste uscătoare, este posibil ca uscarea a 10 kg de mere sau piersici, de mărime medie tăiate în felii subțiri, să dureze o singură zi, chiar și atunci când este parțial înnorat, cețos și foarte umed.

5.2 Uscătoare cu convecție forțată

Convecția este forțată peste alimente prin utilizarea unui ventilator. În cazul uscătoarelor cu convecție forțată, structura poate fi relativ similară. Cu toate

acestea, uscătorul cu convecție forțată necesită o sursă de alimentare pentru ca ventilatoarele să asigure fluxul de aer. Uscătorul cu convecție forțată nu necesită o înclinare pentru fluxul de aer, totuși colectorul poate fi amplasat orizontal cu ventilatorul la un capăt și recipientul de uscare la celălalt capăt. În plus, uscătorul cu convecție forțată este mai puțin dependent de energia solară, deoarece asigură fluxul de aer în sine; acest lucru permite echipamentului să funcționeze în condiții meteorologice în care uscătorul natural cu convecție nu funcționează. Deoarece ventilația inadecvată este o cauză principală a pierderii de alimente în uscătoarele solare de alimente și este agravată de încălzirea intermitentă, este esențial să se realizeze o ventilație adecvată. Adăugarea unui flux de convecție forțată, de exemplu furnizată printr-o celulă solară fotovoltaică conectată la un ventilator, va preveni pierderea alimentelor.

5.3 Uscătoare tip tunel

Structura unui uscător tunel este relativ simplă. Componentele de bază de proiectare ale unui uscător tunel sunt următoarele:

- Un tunel solar de formă semi-circulară sub forma unei structuri încadrate de case din polietilenă cu folie de polietilenă stabilizată UV
- Structura este, spre deosebire de celelalte modele de uscător, suficient de mare pentru a intra o persoană.

5.4 Factori importanți de calitate

Uscarea este o etapă importantă în procesul de producție a alimentelor. Principalul argument pentru uscarea alimentelor este conservarea alimentelor pe perioade mai lungi de timp. Cu toate acestea, este important de reținut că procesul nu se referă doar la eliminarea conținutului de umiditate din alimente. Factorii suplimentari de calitate sunt influențați de selecția condițiilor de uscare și a echipamentului:

- Conținutul de umiditate. Este esențial ca alimentele după uscare să aibă un conținut de umiditate adecvat pentru depozitare. Conținutul de umiditate dorit va depinde de tipul de aliment, durata de păstrare și condițiile de păstrare disponibile. Operația de uscare este, de asemenea, esențială pentru a minimiza intervalul de niveluri de umiditate din lotul de alimente, deoarece porțiunile de alimente subuscate pot duce la deteriorarea întregului lot.

- Valoare nutritivă. Componentele alimentelor pot fi afectate negativ atunci când sunt atinse temperaturi excesive.
- Creșterea mucegaiului. Rata de dezvoltare a microorganismelor depinde de conținutul de umiditate al alimentelor, de temperatură și de gradul de deteriorare fizică a alimentelor.
- Aspectul și mirosul alimentelor. De exemplu, culoarea poate fi afectată negativ dacă produsul este uscat cu uscătoare încălzite direct cu arzătoare sau cuptoare prost întreținute sau funcționate.

5.5 Co-beneficii ale uscătoarelor solare

- Tehnologia oferă mai multe beneficii socio-economice. Una dintre principalele probleme cu care se confruntă țările în curs de dezvoltare astăzi este problema securității alimentare. Uscătorul solar de alimente poate îmbunătăți securitatea alimentară, permițând depozitarea mai lungă a alimentelor după uscare, în comparație cu alimentele care nu au fost uscate.
- Uscătorul solar poate economisi combustibil și energie electrică atunci când înlocuiește variante de uscătoare care necesită o sursă externă de energie sub formă de electricitate sau combustibil fosil. În plus, uscătoarele solare de alimente reduc timpul de uscare în comparație cu uscarea la soare. În timp ce uscătorul alimentat cu combustibili fosili sau electric ar putea oferi anumite beneficii (un flux de aer mai consistent și temperaturi mai ridicate), cheltuielile financiare pe care le oferă aceste tehnologii ar putea fi prea mari pentru micii fermieri. De exemplu, electricitatea ar putea să nu fie disponibilă sau să fie prea scumpă, iar uscarea alimentată cu combustibili fosili ar putea genera costuri inițiale și de funcționare mari.
- Fructele, legumele și carnea uscate într-un uscător solar sunt mai bune calitativ în comparație cu fructele, legumele și carnea uscate în condiții de uscare la soare. După cum sa menționat, datorită sistemului închis, contaminarea alimentelor este prevenită sau minimizată. În plus, alimentele nu sunt vulnerabile la ploaie și praf, în comparație cu sistemul deschis de uscare la soare.
- În zonele rurale în care fermierii cultivă fructe și legume fără instalații adecvate de uscare a alimentelor, fermierii trebuie să vândă alimentele în piață la scurt timp după recoltare. Când producția de alimente este mare, fermierii trebuie să vândă alimentele la prețuri mici pentru a preveni pierderea prin descompunere. Prin urmare, uscătorul solar de alimente ar putea fi capabil să prevină pierderile financiare cu care se confruntă

fermierii în aceste situații. Alimentele uscate pot fi păstrate și pot păstra calitatea mai mult timp. În plus, fructele și legumele uscate ar putea fi vândute ca produse diferențiate, ceea ce poate crește valoarea lor de piață. De exemplu, carnea uscată poate fi procesată într-o varietate de produse diferite.

- Uscarea alimentelor îi reduce volumul. Prin urmare, în combinație cu timpii mai lungi de depozitare, alimentele sunt, de asemenea, mai ușor de transportat după uscare, ceea ce poate deschide piețe suplimentare producătorului de alimente.

5.6 Construcția uscatoarelor de fructe și legume

În funcție de posibilitățile fiecăruia, pot exista producători care achiziționează un uscător de la o firmă specializată și alții care folosindu-și priceperea își pot executa singuri incinte pentru uscare, putând ulterior a le dota cu sisteme moderne de automatizare. În ambele cazuri câteva detalii trebuie avute în vedere atât la achiziție cât și la construcție.

5.6.1 Grosimea și calitatea izolației sunt cele mai importante caracteristici ale unui uscător. De aceste elemente depinde în mod direct eficiența energetică a instalației. O izolație slab executată sau prea subțire poate duce la pierderi mari de căldură ceea ce va scădea eficiența instalației. Cu cât izolația este mai groasă și punctele termice dintre carcasa interioară a camerei și carcasa exterioară sunt mai slabe, cu atât eficiența crește. O mare atenție trebuie acordată de asemenea îmbinărilor și elementelor mobile cum ar fi ușile. Acestea trebuie să dispună de garnituri care să împiedice aerul să scape din incintă.

O izolație bună pentru o astfel de instalație poate fi executată din vată minerală cu o grosime de 100mm între două foi de tablă. O altă soluție sunt panourile “sandwich” dar datorită utilizării acestora în mediu umed va trebui ca cel puțin fața expusă către interior să fie executată dintr-un material inoxidabil (plastic, aluminiu sau inox).



Figura 25 - Izolație termică uscător fructe

5.6.2 Ventilarea aerului este factorul care influenteaza viteza de uscare. Din documentare si cercetari s-a ajuns la concluzia ca o viteza de 4m/s a aerului la suprafata produselor este suficienta pentru o uscare optima. Ideal este ca in functie de tipul produsului aceasta viteza sa poata fi scazuta. O metoda des folosita este utilizarea convertizoarelor de frecventa pentru comanda motoarelor ventilatoarelor. Ventilatoarele utilizate pot fi de doua feluri: axiale si centrifugale.

Ventilatoarele axiale au avantajul posibilitatii inversarii sensului de rotatie, si astfel al sensului de ventilare al aerului. Acest lucru este foarte important pentru uscatoarele unde traseul aerului este lung, excluzand din aceasta categorie uscatoarele tunel care functioneaza in mod continuu. Inversarea sensului de vehiculare duce la o omogenizare a umiditatii produselor si previne uscarea inegala de-a lungul uscatorului. Dezavantajul unora dintre ventilatoare este faptul ca necesita o constructie speciala a motorului (motor tropicalizat) deoarece acesta va lucra la temperaturi si umiditati ridicate, lucruri care implica si un cost mai ridicat. Pentru astfel de ventilatoare se recomanda motoarele cu bobinaj in clasa H, sau cu unele rezerve cele in clasa F.

Ventilatoarele centrifugale au avantajul ca au motoarele in exteriorul fluidului vehiculat, astfel racirea acestora nu mai este o problema. Dezavantajul este ca schimbarea sensului de rotatie nu duce si la schimbarea directiei de vehiculare a aerului ci duce la reducerea randamentului.



Figura 26 - Ventilatoare uscator fructe

5.6.3 Sistemul de incalzire al unei incinte de uscare este dependent in general de tipul de energie folosit. In cazul energiei electrice acesta poate fi format din tuburi cu rezistente electrice sau radiatoare cu apa calda, in cazul in care energia electrica este intai convertita in energie termica prin incalzirea apei ca fluid intermediar. In cazul in care instalatia dispune de incalzirea cu radiatoare pentru apa calda tipul de energie poate fi din cel mai divers, singura cerinta fiind sa existe

o centrala termica, care sa incalzeasca apa la o temperatura optima desfasurarii procesului. In general temperatura optima este cu 10-15 grade celsius mai mare decat temperatura maxima necesara procesului. In general centrale termice indiferent de tipul combustibilului pot produce apa calda la temperatura de 95 grade celsius.

Sistemul de incalzire trebuie dotat cu un sistem de control al agentului termic. In cazul apei acesta poate fi o electrovana cu 2 sau 3 cai. In general se utilizeaza vanele cu 3 cai deoarece este indicat sa recirculam agentul neutilizat inapoi la centrala pentru reducerea timpului de pornire al instalatiei.



Figura 27 - Radiatoare si ventilatoare uscator

5.6.4 Evacuarea aerului uzat trebuie facuta in asa fel incat energia acestuia sa fi fost utilizata cat mai eficient. Evacuarea unui aer prea cald si uscat inseamna pierderi energetice. In functie de modul de functionare al instalatiei aerul este fie recirculat total, partial sau nu se recircula deloc.

In cazul recircularii totale este obligatorie monitorizarea umiditatii aerului pentru a fi evacuat si inlocuit cu aer proaspat in momentul in care nu mai are loc nici un schimb de vapori intre produse si acesta. In cazul recircularii totale, in momentul in care aerul este inlocuit va avea loc o scadere a temperaturii in incinta.

In cazul recircularii partiale, pe intreaga durata a procesului aerul este mentinut la anumiti parametri stabiliti de gradul de recirculare. Permanent in sistem este introdus aer proaspat dar si evacuat aer uzat. Datorita aportului de aer proaspat permanent, vom avea nevoie si de o sursa de energie care sa mentina temperatura la un nivel stabil.



Figura 28 - Sistem admisie-evacuare aer uscator

În cazul în care aerul nu este recirculat există riscul ca în cazul în care instalația nu este dimensionată și construită corespunzător să avem diferențe de umiditate în fructe și randamentul acestuia să fie foarte scăzut. Acest tip de uscătoare pot fi construite pe sistemul solar cu încălzirea directă a aerului din încălț. În unele situații și forme constructive, aceste uscătoare nu necesită nici măcar alimentare cu curent electric pentru ventilație datorită convecției naturale. Aceste tipuri de uscătoare se pretează pentru utilizarea pe timpul verii în zilele însorite. Avantajul costului mic de construcție și operare este umbrat de imprevizibilitatea condițiilor meteo cât și de raportul dintre suprafața ocupată și cantitatea de produse uscate. În orice caz, acest uscător este o alternativă “eco” și poate fi adoptat de oricine dispune de spațiu și nu este presat de obținerea unei producții impresionante.

Construcția sistemului de evacuare a aerului este dependentă de modul de amplasare al ventilatoarelor de recirculare a aerului. În general sunt două metode utilizate: cu clapete amplasate în față și în spatele ventilatorului de recirculare, metoda întâlnită în general la uscătoarele cu tavan fals sau extragerea și introducerea aerului forțat cu ventilatoare auxiliare. Ambele metode sunt valide și se aleg în funcție de necesități și posibilități.

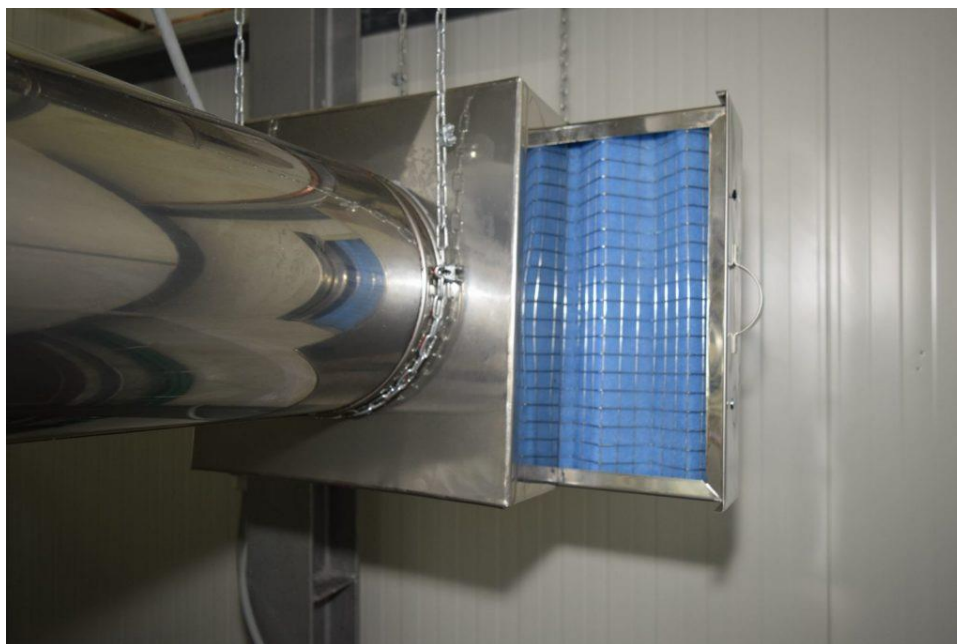


Figura 29 - Filtru admisie uscator

5.6.5 Umidificarea aerului este uneori necesara in cazul produselor sensibile la scaderi bruste de umiditate. Acest sistem consta intr-o duza, care pulverizeaza apa in aerul din incinta pentru ridicarea umiditatii acestuia. Curgerea apei este controlata in general prin intermediul unei electrovalve.

5.6.6 Constructia tavilor reprezinta un factor important din mai multe puncte de vedere. Dimensiunea, masa si materialele din care sunt construite acestea influenteaza atat procesul tehnologic cat si eficienta termica si pe cea financiara. Spre deosebire de sistemele de uscare ale cherestelei, unde materialul supus procesului reprezinta si suportul, in cazul fructelor si legumelor acestea trebuiesc asezate pe o suprafata suport pentru conducerea optima a curenților de aer.

Dimensiunea si masa tavilor poate varia de la producator la producator, dar este indicat ca aceasta sa se incadreze in niste standarde pentru a evita problemele logistice.

Materialele din care sunt construite tavile trebuie sa fie aprobate pentru uzul in industria alimentara, deoarece acestea intra in contact direct cu produsul. Tavile sunt formate in general dintr-o rama si o plasa. Constructia ramei poate fi facuta din inox sau din lemn de esenta tare, ultima varianta fiind cea mai economica. Plasa de sustinere a produselor trebuie sa asigure atat o circulatie adecvata a aerului cat si o curatare usoara a acesteia. Este de evitat folosirea plaselor din aluminiu, plastic sau fibra de sticla deoarece pot afecta calitatea produselor, unele plastice emanand substante nocive. Cel mai indicat material pentru plasele

uscatoarelor este inoxul alimentar. Ochiurile plasei pot fi oricat de mari in asa fel incat sa nu permita produselor sa cada printre ele. Dimensiunea minima a ochiului recomandata este de 1-2 mm. Grosimea firului din care este executata plasa este dependenta si de dimensiunea ochiului dar o valoare minima acceptabila este de 0,2 mm.



Figura 30 - Tava de inox pentru uscator

5.6.7 Materialele utilizate in constructia incintei trebuie sa fie rezistente la mediul cald si umed in care vor functiona. Daca pe exteriorul uscatoarelor poate fi folosita chiar si tabla de otel vopsita in cel mai rau caz, la interior problema sta altfel, materialele oxidabile trebuind evitate pe cat posibil. Chiar si suruburile galvanizate sau cromate vor ceda mai devreme sau mai tarziu. Suprafata incintei de uscare trebuie sa fie la interior executata din materiale cum ar fi aluminiul, inoxul sau plasticul alimentar. In general incintele frigorifice sunt executate din astfel de materiale si in unele cazuri acestea pot fi folosite cu succes pentru uscare. Tavile vor fi asezate pe rafturi, acestea trebuind sa fie executate fie din aluminiu fie din inox. In cazul in care tavile vor fi asezate pe carucioare care vor fi scoase din incinta, acestea pot fi achizitionate direct de la producatorii de profil din industria alimentara, cu mentiunea ca acestea respecta anumite standarde dimensionale.



Figura 31 - Senzori pentru masurarea parametrilor aerului în uscator

5.7 Componente și considerații de proiectare

Cel mai simplu design al unui uscător solar constă dintr-un colector, absorbant, cameră de uscare și izolator. Cu toate acestea, mai multe variante de design au evoluat datorită performanței îmbunătățite a uscătorului și pentru a îndeplini cerința de a furniza produse uscate de înaltă calitate.

5.7.1 Capace colectoare

După cum sugerează și numele, un colector solar captează radiația solară, care este responsabilă pentru efectele de încălzire. Nivelul de insolație variază geografic și nu este constant în niciun moment al zilei. Colectoarele sunt clasificate ca tipuri neconcentrate și concentrante pe baza modului lor de funcționare, adică a capacității lor de a concentra radiația solară incidentă colectată pe o zonă largă într-o anumită regiune. Colectoarele utilizate în uscătoarele solare pot fi de tip parabolic, cubic, plat, dublu sau cu tub evacuat, pentru a îndeplini cerințele specifice regiunii și aplicației. Considerentele de proiectare, cum ar fi unghiul de titrare și poziția colectorului, sunt cruciale pentru obținerea unei eficiențe termice mai mari ([Arun et al., 2019](#)). Acest lucru se datorează necesității de a lua în considerare modificările unghiului luminii solare incidente în timpul zilei. Deși există sisteme sofisticate de control pentru înclinarea automată a colectoarelor, utilizarea lor în aplicațiile de uscare a alimentelor rurale nu este obișnuită. Diferite modele de colectoare solare neconcentrate și concentrante sunt prezentate în [Fig. 32](#), respectiv [Fig. 5](#) ([Suman et al., 2015](#)); cel mai simplu design este un colector cu placă plată și este de obicei combinat cu un dulap de uscare ([Arabhosseini et al., 2019](#)).

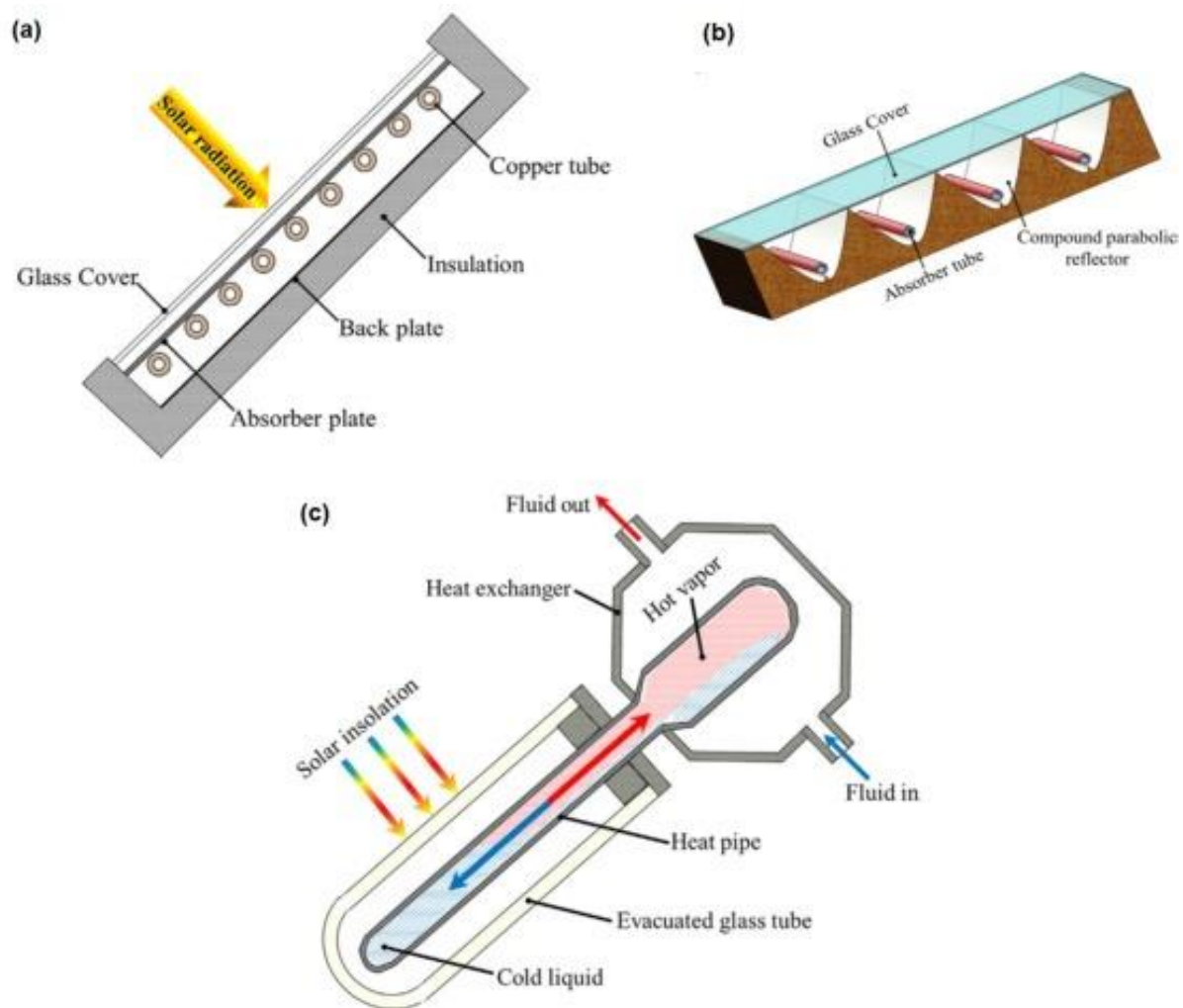


Figura 32. Diagrama schematică a colectoarelor solare neconcentrate (Sursa: [Suman et al. 2015](#)). (a) colector cu plăci plate (b) colector parabolic compus (c) colector cu tuburi evacuate.

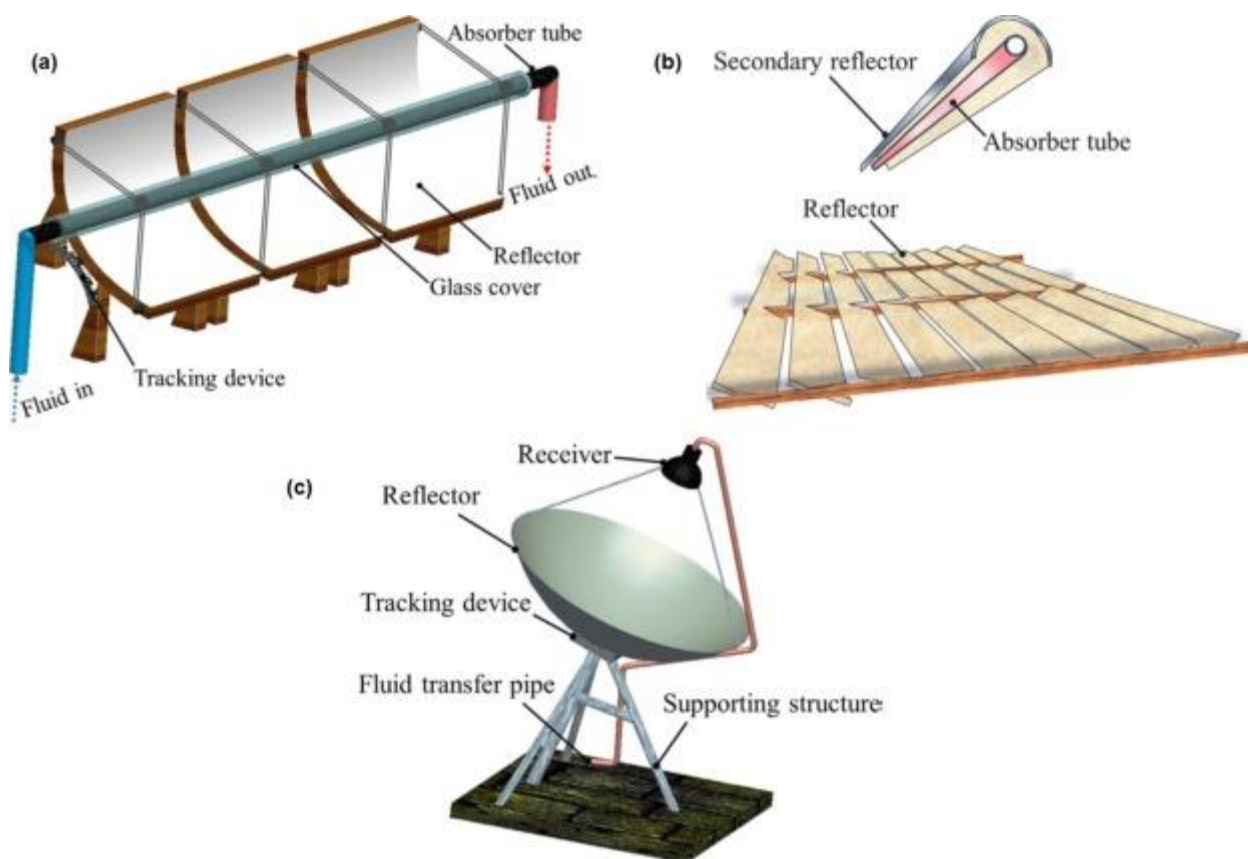


Figura 33. Diagrama schematică a colectoarelor solare cu concentrare (Sursa: [Suman et al. 2015](#)). (a) colector cu jgheab parabolic, (b) reflector liniar Fresnel, (c) reflector parabolic pentru vase.

O altă formă a colectorului cu placă plată este colectorul solar cu tub evacuat (ETSC). Acest sistem este utilizat în mod obișnuit având în vedere simplitatea și cerințele sale pentru întreținere redusă. [Sharafeldin și Gróf \(2018\)](#) au raportat un studiu privind îmbunătățirea eficienței performanței ETSC folosind nanofluide. În acest studiu, CeO_2 nanoparticulele au fost utilizate la trei concentrații volumetrice diferite (0,015, 0,025 și 0,035%) cu rate de flux de masă corespunzătoare. Rezultatele au arătat că utilizarea nanofluidelor a îmbunătățit absorbanta de energie; Eliminarea maximă a căldurii a fost obținută la un debit volumetric de 0,035% și $0,017 \text{ kg/mp}^2$ rata fluxului de masă. Într-un alt studiu, un PCM nano-îmbunătățit de la SiO_2 nanoparticulele au fost folosite pentru stocarea energiei solare. Rezultatele au arătat că nano-îmbunătățirea a scăzut durata de topire și solidificare a PCM, arătând perspective promițătoare pentru îmbunătățirea performanței PCM ([Harikrishnan et al., 2017](#)).

Un colector parabolic compus absoarbe radiația solară prin concentrarea energiei solare din mai multe direcții către un focar comun. Poate fi plasat în

continuare într-un colector de plăci plate pentru a îmbunătăți eficiența acestuia din urmă (Suman et al., 2015). Într-un colector cubic, aerul care intră este încălzit între sticla transparentă (în partea de sus) și baza de fier zincat acoperită de obicei cu negru pentru a absorbi energia solară maximă (Chabane et al., 2019). În colectoarele cu aripioare duble, aerul care intră prin primul canal format de sticla care acoperă placa absorbantă se deplasează către un alt canal format din placa din spate și placa absorbantă cu aripioare, înainte de a se deplasa în camera de uscare, oferind o eficiență cuprinsă între 38 și 78% (Rabha și Muthukumar, 2017).

Spre deosebire de majoritatea colectoarelor care vin cu materiale de acoperire, colectoarele solare cu placă goală pot fi utilizate și atunci când cerințele de creștere a temperaturii nu depășesc 10 °C. În afară de creșterea temperaturii, rezistența mecanică și durabilitatea materialelor sunt considerente importante de proiectare. Tipul materialului, poziționarea, suprafața și unghiul de înclinare sunt factori decisivi pentru o eficiență îmbunătățită (Mustayen et al., 2014). De exemplu, un unghi de înclinare de 23,5 ° pe colector și reflector poate oferi rate de încălzire îmbunătățite, deoarece ia în considerare unghiul de înclinare a pământului de-a lungul orbitei sale revoluționare, determinând un obiect înclinat să primească mai multă insolație decât unul orizontal. Mai mult, calculele suprafeței colectorului trebuie făcute meticulos, deoarece afectează direct cantitatea de căldură generată în sistem. În afară de factorii de proiectare, interferențele atmosferice asupra absorbției și împrăstierii luminii și mișcarea relativă a pământului și a soarelui afectează semnificativ ratele de uscare. Luând în considerare toate aspectele, în general, colectoarele solare au rate scăzute de transfer de căldură, variind de la 45,93 la 83,65% (Aldabbagh et al., 2010).

Colectoarele echipate cu defletoare favorizează efectele de turbulență și, prin urmare, îmbunătățesc transferul de căldură (Chabane et al., 2019). Defletoarele pot fi poziționate în direcții transversale, longitudinale sau mixte și pot fi alese în funcție de cerințele aplicației. Utilizarea unei configurații de plăci poroase cuplată cu un sistem de reciclare îmbunătățește eficiența de uscare a uscătorului solar pentru dulapuri, permițând o mai bună utilizare a energiei termice (Arabhosseini et al., 2019). În colectoarele de tip seră, colectorul ocupă spațiul maxim. Aceste colectoare se potrivesc mai bine aplicațiilor care implică cantități mari de probe și, prin urmare, sunt apte pentru uscarea la nivel de vrac în zonele rurale (Kumar et al., 2016). Ideea este de a oferi efectul de încălzire cu efect de seră care maximizează conversia energiei solare în căldură cu pierderi

minime de căldură (Chauhan et al., 2018). Cu toate acestea, alegerea materialelor utilizate pentru fabricație este critică, necesitând de obicei investiții mari de capital. Ca variantă, uscătoarele solare în tunel au fost utilizate cu energie fotovoltaică (PV) pentru îmbunătățirea eficienței uscătoarelor la costuri reduse de întreținere, evitând și necesitatea încălzitoarelor electrice auxiliare (Eltawil et al., 2018). O altă formă modificată este un colector solar cu dublu scop care este utilizat pentru încălzirea aerului și a apei pentru aplicații de uscare solară și încălzire a apei (Krishnaraj și Arun, 2020). Pentru a spori eficiența termică, s-au depus eforturi abundente pentru a îmbunătăți designul uscătoarelor solare cu ajutorul PCM-urilor adecvate și îmbunătățirea caracteristicilor geometrice ale colectoarelor, concentrând astfel energia solară utilizată pentru uscare (Samimi-Akhijahani și Arabhosseini, 2018).

5.7.2 Absorbant

Absorbantele sunt plasate sub colectorul transparent pentru a absorbi radiația solară și pentru a emite energie termică. De obicei, acestea sunt alcătuite din foi metalice, cum ar fi fier zincat (absorbție = 0,89-0,92) (Bhardwaj et al., 2019), placă de zinc ondulată neagră sau plăci de aluminiu (absorbție = 0,40-0,65) (Murali et al., 2020). Pentru a oferi efecte de încălzire îmbunătățite cu o suprafață crescută, suprafețele absorbante pot fi ondulate sau pot avea un finisaj poros. În plus, pot fi vopsite în negru și conțin plasă metalică sau aşchii ca umplutură. Cu o gamă mai bună de captare a energiei termice în sistem, aceasta din urmă permite o creștere mai mare a temperaturii în interiorul uscătorului. Materiale precum roca spartă și cărbunele au fost, de asemenea, folosite ca materiale de umplere absorbante (Chavan et al., 2020).

Nivelurile mai ridicate de insolație permit o mai bună absorbție a energiei, iar alegerea materialului absorbant depinde de capacitatea materialului de a emite lungimi de undă infraroșii care pot crește temperatura aerului în contact (Lingayat et al., 2020). Materialele transparente de acoperire utilizate pe suprafețele colectoarelor ar trebui să restricționeze scurgerea acestor radiații cu lungime de undă mai mare. Alte considerente de proiectare includ unghiul dintre insolația incidentă și suprafața plăcii absorbante, absorbția și emisivitatea plăcii absorbante, transmisivitatea materialului de acoperire și conductivitatea termică a materialului (Tagnamas et al., 2020). Deși nu este practic în orice moment, asigurarea a 90° între insolația incidentă și suprafața plăcii absorbante este ideală.

5.7.3 Reflectoare

Reflectoarele sau panourile de concentrare pot fi plasate în uscător sau separat. Ele ajută la concentrarea cantității maxime de radiație solară asupra colectorului/camerei de uscare (Dorouzi et al., 2018). Reflectoarele sunt de obicei fabricate din folii de Mylar aluminizate capsate pe panouri de lemn și pot fi, de asemenea, înlocuite cu folii de aluminiu sau vopsele spray reflectorizante (Mustayen et al., 2014). Utilizarea reflectoarelor în uscătoarele solare de tip mixt poate reduce timpii de uscare cu până la 21% (Djebli et al., 2019).

5.7.4 Izolator

Izolația este prevăzută pe părțile laterale și în partea inferioară a colectorului solar pentru a minimiza pierderile termice datorate curenților de conducție și convecție. De asemenea, minimizează pierderile termice datorate radiațiilor absorbantului și aerului în contact. Prin natura sa, aerul este un bun izolator (conductivitate termică de 0,0257 W/mK la 20 °C) și, în condiții statice, restricționează transferul de căldură convectiv între capacul transparent și absorbant. Izolatorii tipici utilizați în uscătoarele solare includ carton sau termocol (Shringi et al., 2014), vată de sticlă (Singh și Sethi, 2018), vată bazaltică (Goud et al., 2019), poliuretan (ELkhadraoui et al., 2015), fibră de sticlă (Simo-Tagne et al., 2020) și vată minerală (Reyes et al., 2013). La nivel rural, produsele agricole, cum ar fi coaja de nucă de cocos, coaja de orez și bagasa din trestie de zahăr, pot fi folosite ca izolatori. Pe lângă disponibilitatea largă, aceste materiale oferă și conductivități termice scăzute.

5.7.5 Camera de uscare

Camera de uscare conține produsul umed și poate fi alcătuită din materiale transparente (tip direct) sau material opac (tip indirect) (Ameri et al., 2018). De obicei sunt fabricate în două forme geometrice: prismă triunghiulară sau cubică. Se știe că primul captează mai multă radiație solară, permițând un transfer îmbunătățit de căldură. În ambele cazuri, materialele izolatoare pot fi furnizate de-a lungul părților laterale ale camerei de uscare pentru a minimiza pierderile termice.

Tăvile de uscare pot fi alcătuite din plase de bambus, aluminiu sau plase de sârmă din oțel inoxidabil cu mânere metalice. Tăvile sunt adesea acoperite cu materiale de calitate alimentară de culoare neagră. Într-un uscător solar tipic, produsul se usucă în principal prin efectele de conducție ale tăvii și efectele de convecție ale curenților de aer (Prakash și Kumar, 2017). Distanța dintre tăvi și

între tăvi și perete afectează semnificativ distribuția fluxului de aer și, prin urmare, modelele de încălzire. În acest scop, aproximativ 33,33 până la 50% din distanța dintre tava inferioară și camera de uscare este asigurată ca distanță între tăvi (Basumatary et al., 2013). În cazul uscătoarelor solare de tip mixt, camera este de tip hibrid, permițând aerului cald din lateral și radiației de la capacul superior din sticlă să treacă în camera de uscare (Lakshmi et al., 2018).

5.7.6 Aspiratoare

Orificiile de aerisire, coșurile de fum și ventilatoarele pot fi utilizate pentru a evacua aerul umed din camera de uscare. Acest lucru este esențial, deoarece o umiditate relativă (RH) foarte mare nu favorizează uscarea corectă, dar ar duce la condensarea umezelii. Acestea pot fi explicate folosind o diagramă psicrometrică tipică (Sharma și Kar, 2015). Coșurile de fum se bazează pe efectele naturale de convecție și flotabilitate rezultate din gradientele de temperatură din camera de uscare. Sunt ieftine și nu necesită surse suplimentare de energie. Fluxul de aer este de obicei laminar (streamline) la viteze atât de mici. Cu toate acestea, utilizarea ventilatoarelor poate oferi efecte mai bune de transfer de masă (umiditate). Acest lucru se datorează faptului că astfel de condiții duc la creșterea fluxului de aer cu turbulențe proeminente. Prin urmare, debitele de aer volumetric ridicate prin conducte înguste pot contribui la îmbunătățirea eficienței colectorului. Cu toate acestea, odată cu o creștere a debitului de aer volumetric, există riscul unei căderi de presiune crescute și a unor creșteri mai mici de temperatură. Căderile de presiune crescute, la rândul lor, necesită utilizarea unor ventilatoare mai puternice (Moses et al., 2013a, Moses et al., 2013).

5.7.7 Ventilatoare

În condiții ambientale, când curenții de convecție induși termic nu favorizează rate de uscare mai mari (ca în convecția naturală), ventilatoarele pot fi utilizate suplimentar pentru a îmbunătăți diferențele de presiune (Djebli et al., 2020). În timp ce primul se referă la modul pasiv, cel de-al doilea se referă la uscarea solară în modul activ. Pe lângă îmbunătățirea debitului de aer, ventilatoarele permit și utilizarea uscătoarelor solare pentru aplicații care implică straturi adânci de materii prime, în special cereale alimentare. Acest lucru funcționează mai bine, deoarece rezistența la fluxul de aer oferită de paturile de cereale adânci este mare și nu poate fi depășită altfel doar prin convecție naturală. Este vital să vă asigurați cu prudență că modelele de distribuție a fluxului de aer în astfel de sisteme sunt adecvate (Moses et al., 2014a, Moses et al., 2014b). Cu

toate acestea, alegerea utilizării suflantelor suplimentare este esențială, deoarece implică surse suplimentare de energie, costuri de capital, operaționale și de întreținere; o abordare care nu este foarte bine primită pentru aplicațiile rurale.

5.7.8 Surse de căldură auxiliare

Pentru a crește eficiența de uscare și pentru a permite utilitatea maximă în toate condițiile climatice, pot fi necesare surse de încălzire suplimentare. Arzătoarele pe bază de biomasă și GPL sau încălzitoarele electrice sunt exemple comune ([Murali et al., 2020](#), [Sethi și Dhiman, 2020](#)). De obicei, un arzător de biomasă folosește coji de nucă de cocos, așchii de lemn, cărbune, coajă de orez sau coajă de orez ca brichete de combustibil. Gazele de ardere obținute după arderea biomasei conțin fum, cenușă, praf, urme de azot, dioxid de carbon și alte gaze nocive care nu sunt adecvate pentru uscarea produselor alimentare. Acest lucru se datorează faptului că acești compuși pot avea implicații grave asupra aromei, culorii și atractivității senzoriale generale a produselor alimentare. Mai mult, anumiți compuși pot duce la toxicitate și efecte asupra sănătății atunci când sunt conținuți în alimente. Cu toate acestea, utilizarea unui arzător pe gaz GPL poate evita astfel de probleme ([Ortiz-Rodriguez et al., 2020](#)), doar cu prețul disponibilității sale reduse în zonele rurale. Acesta este cazul chiar și cu încălzitoarele electrice; cu toate acestea, utilizarea lor poate deveni obligatorie în timpul orelor fără soare sau când sunt necesare rate de uscare rapidă ([Mohajer et al., 2013](#)).

5.7.9 Sisteme de stocare a energiei

Energia solară poate fi, de asemenea, stocată și utilizată pentru aplicații de uscare ([Tabelul 3](#)). Aceasta poate fi sub formă de căldură sensibilă (folosind un pat de stâncă) sau căldură latentă (folosind PCM) ([Atalay, 2020](#)).

Tabelul 3. Variante de proiectare a sistemelor de stocare a energiei termice în uscătoarele solare utilizate pentru aplicații alimentare.

Instalație de stocare a energiei	Tip uscător	Locația experimentului	Condiții atmosferice	Material izolant utilizat	Caracteristici de proiectare a uscătorului	Produs alimentar uscat	Alte observații	Referințe
Unitate de stocare termică pe bază de PCM – ceară de parafină	Uscător de tunel solar	Assam, India	Viteza aerului 0,6 m/s; temperatura de uscare 55-74 °C; radiație solară 830 W/m ²	Vopsea epoxidică siliconică tip industrial UGAM HR 200	Uscătorul solar cu sistem fotovoltaic împreună cu PCM a fost proiectat pentru uscare chiar și în afara orelor de soare	Fructul stelei	Uscarea a avut loc în principal în perioada de scădere. Probele uscate la soare au prezentat niveluri mai ridicate de conținut fenolic total și activitate de eliminare a radicalilor 2,2-difenil-1-picrilhidrazil decât probele uscate la soare	Kondareddy et al. (2020)
Material de stocare termică NaCl	Uscător solar mixt	Sud-estul Nigeriei (unghi de orientare 15,5° spre sud)	RH ambiental 60-95%; temperatura 30 °C	Fibra	Uscătorul consta dintr-un colector cu plăci plate cu un absorbant și o unitate de uscare îndreptată spre sud 15,5 °	Chili roșu	Datele experimentale ale rapoartelor de umiditate, temperatură și umiditate relativă cu și fără NaCl au fost în concordanță cu simularea numerică	Simo-Tagne et al. (2020)
Încălzitor electric auxiliar	Uscător solar indirect pe bază de convecție	Maroc (unghi de latitudine 31°)	Temperatura de uscare 60, 70 și 80 °C; debit volumetric 0,1845 m ³ /s; temperatura ambiantă 21 și 32 °C; RH 17–27%	NA	Echipat cu colector solar de aer, ventilator centrifugal, termoregulator, cameră de uscare și ventilator	Cireșe dulci marocane (Cultivar <i>B urlat</i>)	Probele uscate solare au arătat cea mai mare retenție a activității fenolice și antioxidante totale în perioada de depozitare de un an	Ouaabou et al. (2020)
Încălzitor electric auxiliar	Uscător solar cu convecție forțată indirectă	Maroc (martie-aprilie 2018; 9:00 - 16:30)	Temperatura de uscare 50–80 °C; debit de aer 0,0416 și 0,0833 m ³ /s; temperatura	NA	Echipat cu un colector solar de 2,5 m ² cu o înclinație de 31°; canal aerulic aspirant; ventilator centrifugal și termoregulator	Trufe	Modelul lui Midilli-Kucuk a descris bine cinetica de uscare a trufelor cu difuzivitatea umidității variind de la	Tagnamas et al. (2020)

Instalație de stocare a energiei	Tip uscător	Locația experimentului	Condiții atmosferice	Material izolant utilizat	Caracteristici de proiectare a uscătorului	Produs alimentar uscat	Alte observații	Referințe
			ambiantă 26-32 °C; RH 11-31%				$7,97 \times 10^{-10}$ și $1,37 \times 10^{-9}$ m ² /s; energie de activare 76,37 kJ/mol	
Încălzitor electric auxiliar	Uscător hibrid solar-electric	Cochin, India (martie - aprilie 2018; 9:30 - 17:30)	Temperatura aerului de uscare 45-55 °C; viteza aerului 0,6-0,8 m/s; RH 47-62%	NA	Consta dintr-o cameră de uscare, un colector solar de aer cu placă plată și un sistem de rezervă suplimentar / de încălzire	Macrou indian (<i>Rastrelliger kanagurta</i>)	Aplicarea colectoarelor solare de aer cu sistem de încălzire suplimentară a menținut o temperatură de uscare controlată de 50-55 °C și a ajutat la obținerea unei uscări uniforme	Murali et al. (2019)
Sistem termic auxiliar de recuperare a căldurii	Uscător solar hibrid	Malaezia (4,39° latitudine nordică și 100,9° longitudine cu orientare spre sud 0°; 8:00 - 19:00)	Temperatura aerului ambiant 25 °C	Vată de sticlă	Constă dintr-un colector solar, cameră de uscare, sistem de rezervă termică și uscător de recuperare	Chili roșu	Îmbunătățirea eficienței generale de uscare (25,84% în uscarea hibridă zi și noapte și 29,7% în uscarea termică pe timp de noapte)	Yassen și Al-Kayiem (2016)
Sistem asistat termic pe biomasă	Uscător de seră hibrid	Ludhiana, India (30° latitudine nordică; orientat est-vest cu acoperișul înclinat la 9,46° spre sud; 17 ianuarie și 10	RH 45-85%; temperatura aerului ambiant 11-21 °C	Vată ceramică	Consta dintr-un combustor de paie de orez cu tiraj forțat și o rețea de conducte de transfer de căldură a gazelor de ardere așezate în interiorul uscătorului de seră	Uscarea schindufului	Căldură suplimentară de aproximativ 26,2 kW și 13,4 kW la temperaturi nocturne severe și moderate de 5 °C și 10 °C satisfăcută de arderea completă a 80 kg și, respectiv, 40 kg de paie de orez pe oră, pentru a menține temperaturile aerului între 60 și 62 °C	Sethi și Dhiman (2020)

Instalație de stocare a energiei	Tip uscător	Locația experimentului	Condiții atmosferice	Material izolant utilizat	Caracteristici de proiectare a uscătorului	Produs alimentar uscat	Alte observații	Referințe
		iunie 2017; 9:00 - 19:00)						
Stocarea energiei termice cu pat umplut (PBTES) – pietriș și PCM TES – ceară de parafină	Uscător solar de tip indirect	Izmir, Turcia (iunie 2019; 9:00 - 23:30)	temperatura ambiantă 28 °C; RH 15-40%; debit masic de aer 0,02–0,08 kg/s	NA	Echipat cu un mediu de stocare a energiei, plăci perforate, colector de aer, ventilator și filtru	Felii de lămâie (5 mm grosime)	Energia termică maximă stocată în perioada de încărcare a fost de 52,59 MJ și 49,52 MJ pentru PBTES și, respectiv, PCM; eficiența energetică medie a fost de 68,2% și, respectiv, 68,55% pentru PBTES și, respectiv, PCM	Atalay (2020)
TES - material sensibil de stocare a căldurii (SHSM) apă	Uscător solar hibrid GPL	Kerala, India (9,93° N și 76,26° E; noiembrie 2018 - ianuarie 2019; 10:30 - 16:30; orientat spre sud)	Temperatura aerului ambiant 30 °C; RH 70%; debit de aer 598 m ³ /h; radiație solară 515 W/m ²	Spumă poliuretanică (PUF)	Consta dintr-o cameră de uscare, suflante, evacuare, colector solar de aer cu sistem manual de urmărire solară, rezervor de stocare a apei și o unitate auxiliară de încălzire a apei GPL	Crevetă	Conținutul de umiditate al creveților proaspeți a fost redus de la 76,71% la 15,38% w.b. în 6 ore; eficiența colectorului și a uscătorului a fost de 42,37% și, respectiv, 37,09%	Murali et al. (2020)
Material sensibil de stocare a căldurii (SHSM) – resturi de fier amestecate cu pietriș și	Uscător solar cu convecție forțată indirectă	Solan, India (30.91° latitudine nordică; octombrie 2016; 9:00 până la saturația de umiditate)	Temperatura aerului ambiant 19-30 °C; RH 38-56%; insolație solară 560 W/m ²	Poliuretan	Consta dintr-un colector solar cu placă plană cu tuburi de cupru care conțineau ulei de motor ca SHSM și PCM	Plantă medicinală - <i>Valeriana jatamansi</i>	Capacitatea de rehidratare și vâscozitatea totale au fost de 7,11 și 3,47% față de 6,18 și, respectiv, 3,31% în cazul uscării tradiționale la umbră. Colectorul solar fără SHSM a avut eficiențe medii de energie și	Bhardwaj et al. (2019)

Instalație de stocare a energiei	Tip uscător	Locația experimentului	Condiții atmosferice	Material izolant utilizat	Caracteristici de proiectare a uscătorului	Produs alimentar uscat	Alte observații	Referințe
PCM (parafină)							exergie de 9,8% și 0,14%, iar cu SHSM a fost de 26,10 și, respectiv, 0,81%	
SHSM – nisip și resturi de aluminiu	Uscător solar cu convecție forțată	Pollachi, India (10.39°N latitudine, 77.03°E longitudine)	Debit de aer: 0,025 kg m ⁻² s ⁻¹	Vată de sticlă	Consta din încălzitor solar de aer cu placă plată, cameră de uscare, placă absorbantă și izolație	Copra	Conținutul de umiditate a fost redus de la 52% la 8% în 80 și, respectiv, 104 ore pentru uscătorul solar integrat cu și fără materiale de stocare a căldurii. Indiferent de utilizarea materialului de stocare termică, eficiența medie a uscătorului solar a fost de aproximativ 23%	Mohanraj și Chandrasekar (2009a)
SHSM - pietriș	Uscător solar cu convecție forțată indirectă	Pollachi, India (10.39°N latitudine, 77.03°E longitudine)	Debit de aer 0,25 kg/s	Vată de sticlă	Consta dintr-un încălzitor solar de aer cu placă plată, cameră de uscare, placă absorbantă, izolație și capac transparent orientat spre sud cu orientare de 25° față de orizontală	Ardei iute	Eficiența medie de uscare a fost estimată la 21%, cu o rată de extracție a umidității de 0,87 kg/kWh	Mohanraj și Chandrasekar (2009b)
Sistem de stocare bazat pe PCM	Uscător solar cu convecție forțată	Udaipur, India (iunie 2013)	Temperatura aerului cald 39–69 °C și radiația solară 500–1100 W/m ²	Thermocol, vată bazaltică și vată de sticlă	Consta din cameră de uscare și unitate de dezumidificare, unitate de stocare a căldurii și schimbător de căldură și colector de tuburi evacuate cu unghi de înclinare de 20 °	Cățel de usturoi	Eficiența energetică fără și cu recircularea aerului care iese din camera de uscare a variat de la 43,06 la 83,73% și, respectiv, de la 3,98 la 14,95%, în timp ce eficiența exergiei a variat de la 5,01 la 55,30% și, respectiv, de la 67,06 la 88,24%	Shringi et al. (2014)

Instalație de stocare a energiei	Tip uscător	Locația experimentului	Condiții atmosferice	Material izolant utilizat	Caracteristici de proiectare a uscătorului	Produs alimentar uscat	Alte observații	Referințe
Sistem de stocare pe bază de PCM (parafină)	Uscător solar de dulapuri în mod mixt	Kerala, India (11° 32' N și 75° 93' E; februarie 2018; 7:00 am - 6:30 pm)	Temperatura ambiantă 24-35 °C; debit masic 0,015–0,03 kg/s; radiație solară 420 W/m ²	Poliuretan	Echipat cu colector cu placă plată orientată spre sud cu o înclinație de 10,18° cu unitate de stocare a energiei orizontală și cameră de uscare	Banană (fulgi cilindrici cu diametrul 0,04–0,045 m)	Au fost raportate efectul secvențierii tăvii asupra grosimii fulgilor, distanței dintre mai multe tăvi și debitului; intensitatea solară medie de 420 W/m ² cu o temperatură medie a colectorului de 48,5 °C	Arun et al. (2019)
Sistem de stocare a căldurii cu deshidratare lichidă (clorură de calciu 30% din masă) cu o unitate de încălzire auxiliară	Uscător solar indirect	Iran (experiment efectuat în aprilie 2016; 9 am - 3 pm)	Temperatura ambiantă în jur de 40 °C; RH 9 și 16%; insolație solară 607 și 943 W/m ²	NA	A constatat din pat de desicant lichid, sistem de regenerare cu adsorbție PV-T, absorbant solar; colector montat spre orientare sud	Roșie (grosimea feliei de 5 mm)	Energia electrică necesară pentru uscarea roșiilor a variat de la 0,65 la 1,4 kWh. S-a recomandat o temperatură de 60 °C și o umiditate relativă de activare de 23% pentru feliile de roșii	Dorouzi et al. (2018)
Desicant solid (silicagel)	Uscător solar indirect	Malaezia (27 și 28 noiembrie 2013; 9:30 - 17:00)	Temperatura aerului ambiant 30-35 °C; viteza medie a aerului 12,5 m/s; radiație solară 100–950 W/m ²	Polietilenă	Constă din pompă de evacuare, pompă de circulație, cameră de uscare și colector solar orientat spre nord, înclinat la 7°	Fibră de miez Kenaf (grosime 6 cm)	Procentul de energie solară utilizată a fost de 44% din energia totală; Uscătorul solid cu adsorbție asistat de energie solară poate funcționa chiar și la radiații solare scăzute	Misha et al. (2015)
Sistem de stocare a căldurii	Uscător solar cu	Guwahati, India (orientat spre	Temperatura aerului ambiant 24–35 °C; debit de aer 0,019	PUF	Constă din încălzitoare solare cu dublă trecere, modul de stocare a căldurii latente	Chili roșu	Consumul specific de energie și eficiența generală a sistemului de	Rabha și Muthukumar (2017)

Instalație de stocare a energiei	Tip uscător	Locația experimentului	Condiții atmosferice	Material izolant utilizat	Caracteristici de proiectare a uscătorului	Produs alimentar uscat	Alte observații	Referințe
latente pe bază de PCM (parafină)	convecție forțată	sud la 26.18° latitudine; 24-27 aprilie 2016; 8:00-18:00)	kg/s; radiație solară 878–936 W/m ²		carcasă și tub, cameră de uscare și suflantă		uscare au fost de 6,8 kWh pe kg de umiditate și, respectiv, 10,8%; consumul de energie electrică al uscătorului a fost de 10,3% din consumul specific de energie	
Încălzitor electric și unitate de încălzire auxiliară cu apă ca mediu de stocare termică	Uscător solar hibrid	Germania (unghi de înclinare 0° orizontal; durata 2005-2006)	Temperatura aerului ambiant 20-25 °C; radiație solară 300–700 W/m ²	Polistiren	Constă dintr-un schimbător de căldură, cameră de uscare și colector solar	Banană	Reducerea umidității de la 82% la 18% în 8 ore	Amer et al. (2010)
Desicant solid – CaCl ₂	Uscător solar indirect cu convecție forțată	Chennai, India (12 iunie 2004)	Debit de aer 0,03 kg/m ² s; temperatura aerului ambiant 30-35 °C; RH 40-80%; radiație solară 200–950 W/m ²	Așchii de lemn	Colectorul a constat din sticlă transparentă în partea de sus și tablă de cupru vopsită în negru sub sticlă; Cameră de uscare, capac dublu în partea superioară a colectorului cu înclinare de 30° spre sud	Mazăre verde	Umiditate de echilibru atins în 14 ore la un debit de aer de 0,03 kg/m ² s cu un raport de contracție de masă de 60%	Shanmugam și Natarajan (2006)
Încălzitor electric și unitate de încălzire auxiliară cu apă ca mediu de stocare termică	Uscător solar indirect hibrid	Dezful, Iran (32° 220' latitudine și 48° 240' longitudine cu 20° orientat spre sud)	Debit de aer 0,021 kg/s; temperatura aerului 44 °C	Cauciuc siliconic și polistiren – izolație laterală; Wată din fibră de sticlă și polistiren – izolație spate	Colector solar cu dublă utilizare izolat cu polistiren, cauciuc siliconic și fibră de sticlă; ventilator electric și încălzitor electric	Pătrunjel, mărar și coriandru	Aproximativ 91,2% schimbare a greutateii; rata de contracție de 80%; sursa de încălzire suplimentară a crescut costurile și a avut efecte de deteriorare asupra calității produsului	Mohajer et al. (2013)

Diferitele poziții de plasare a materialului de stocare termică în uscătoarele solare sunt prezentate în Fig. 34. Deși abordările care implică stocarea căldurii sensibile sunt mai simple de proiectat și întreținut, stocarea căldurii latente este mai eficientă din punct de vedere energetic datorită densităților mari de stocare a energiei asociate. În timpul procesului de încărcare, energia termică este absorbită de PCM, atingând și căldura latentă de topire. În timpul descărcării, căldura este eliberată în împrejurimi, până când temperatura materialului scade sub punctul de îngheț al materialului (Mishra et al., 2019). În ambele cazuri, în funcție de configurațiile de proiectare, energia termică este disponibilă atunci când nu există posibilitatea de a capta energia solară. Deși perioadele de uscare în orele târzii ale serii pot fi prelungite, există și riscul unei creșteri a timpilor de "încălzire" în timpul orelor de dimineață. Cu toate acestea, abordarea rămâne obligatorie pentru anumite produse, cum ar fi tutunul, care nu își pot permite lacune în procesul de uscare.

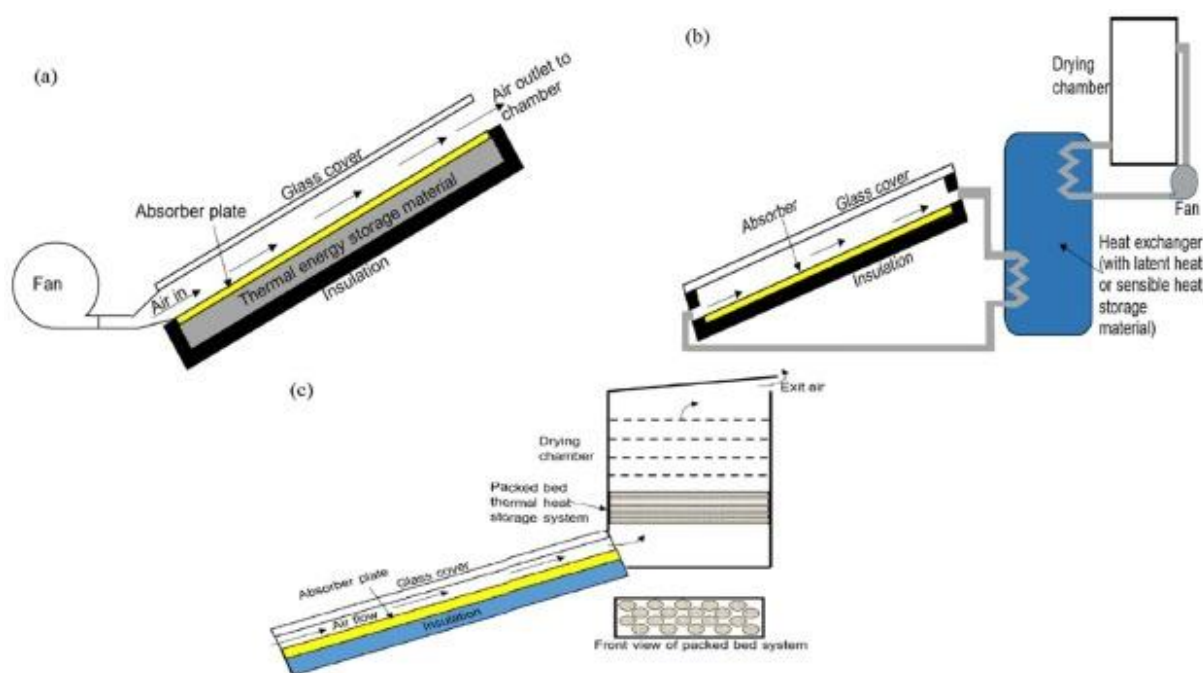


Figura 34. Diagrama schematică a colectoarelor solare de aer cu materiale de stocare termică (Sursa: Lingayat et al. 2020). (a) plasate sub suprafața absorbantului, (b) plasate în schimbătorul de căldură, (c) plasate în interiorul camerei de uscare.

În plus, un material desicant poate fi utilizat și pentru dezumidificarea aerului de uscare, crescând astfel temperatura aerului. Desicanții solizi (cum ar fi silicagelul și alumina activată) sunt mult mai ușor și mai siguri de manevrat și, în general, nu provoacă probleme de coroziune,

cum ar fi cele asociate cu desicanții lichizi (cum ar fi acidul sulfuric sau glicolul) (Dorouzi et al., 2018, Misha et al., 2015). Pe lângă faptul că nu sunt corozive, desicanții nu trebuie să genereze particule de praf care ar duce la contaminarea produsului. Astfel de materiale diferă prin potențialul lor de reținere a apei și gradele de schimbare a temperaturii odată cu schimbarea umidității aerului. În general, oferă un potențial mai mare de stocare a căldurii și nu necesită izolații suplimentare pentru a limita pierderile de căldură. Acestea pot fi regenerate pentru utilizare ulterioară prin expunerea la lumina soarelui.

Un uscător solar poate fi încorporat cu un PCM sau unitatea de stocare a căldurii poate fi conectată separat cu încălzitorul. PCM-urile pot fi organice (ceară de parafină) sau anorganice (clorură de calciu hexahidrat) și sunt alese în funcție de aplicație și cerințe. Analiza detaliată a acestui aspect a fost făcută de Shalaby et al. (2014). Fig. 35 a prezintă diferitele componente ale unui uscător solar cu o unitate de stocare termică PCM (Khouya și Draoui, 2019). Iranmanesh et al. (2020) au evaluat performanța unui uscător solar cu și fără utilizarea PCM (Fig. 35b). Experimentele au fost efectuate la trei debite de aer diferite; s-a observat că PCM ar putea crește energia termică la aproximativ 1,72% și 5,12% pentru debite de aer de 0,025 și, respectiv, 0,05 kg/s. Cu toate acestea, aceste valori au scăzut la un debit de aer mai mare de 0,09 kg/s. O eficiență generală de uscare de aproximativ 40% a fost obținută cu un debit de aer de 0,025 kg/s, iar utilizarea sistemului de stocare termică ar putea reduce cerințele de timp de uscare cu aproximativ 9,37-10%. Utilizarea PCM nu a avut efecte adverse asupra calității feliilor de mere uscate.

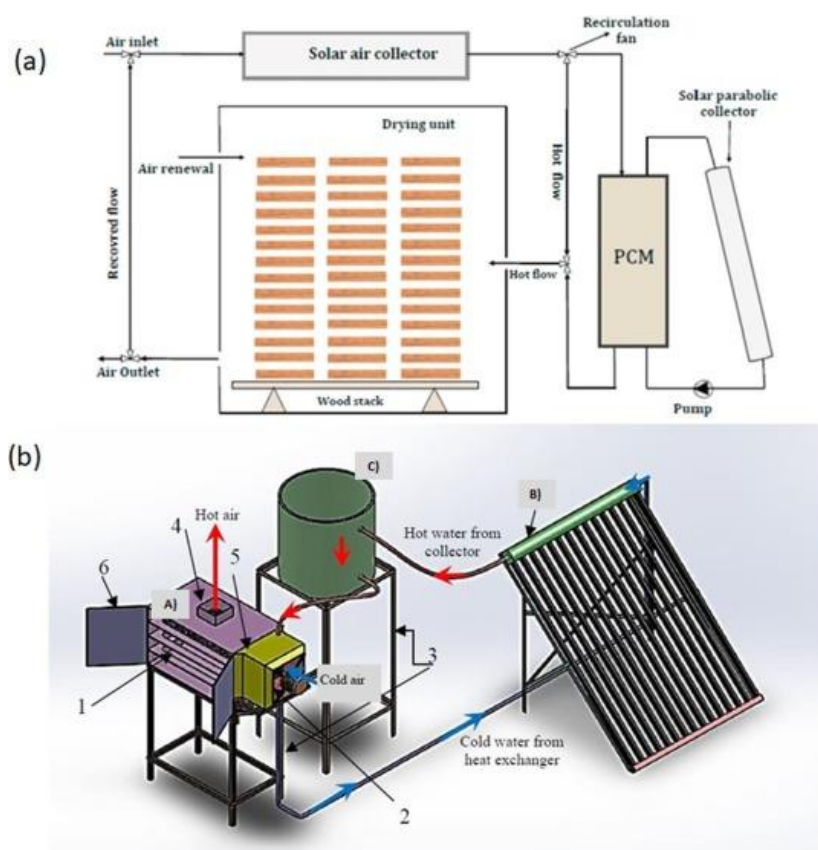


Figura 35. Diferite variante de uscătoare solare pentru dulapuri (a) cuptor solar tipic conectat cu unitatea PCM (Sursa: [Khouya și Draoui 2019](#)); (b) uscător de dulap ETSC (Sursa: [Iranmanesh et al. 2020](#)) A) uscător: 1. tavă și dulap de probe, 2. ventilator, 3. șasiu, 4. canal de evacuare, 5. schimbător de căldură, 6. ușă; B) ETSC; C) rezervor de stocare cu container PCM interior.

5.8 Surse de energie pentru uscarea alimentelor

Consumul energetic va reprezenta principalul cost de operare al unui utilaj de uscare. Consumul energetic este reprezentat de consumul de energie termica necesar incalzirii si vaporizarii apei si de energia electrica necesara vehicularii aerului si sistemului de control al procesului.

Utilajele care functioneaza convectiv si fara recuperatoare de caldura au un randament de maxim 50% din cauza caldurii evacuate odata cu aerul care contine umiditatea preluata de la produse. Prin utilizarea unui recuperator de caldura randamentul termic al unei instalatii de uscare convectiva poate fi ridicat cu pana la 30%, dar acest dispozitiv poate fi folosit numai in anumite cazuri, deoarece implica curatarea sa periodica, iar din cauza constructiei sale acest lucru este destul de dificil.

Un consum minim de energie termica in cazul uscatoarelor convective care lucreaza in gama de temperaturi 40 – 90 °C este de 1.4 kwh / kg apa evaporat [3],

ținând cont de randamentul teoretic maxim de aproximativ 50% al acestui tip de utilaje. În cazul în care un uscător este bine proiectat acesta se poate apropia de acest randament teoretic. De asemenea, pentru vehicularea aerului se utilizează ventilatoare care pot avea un consum cuprins între 1 și 3 kW. Pentru asigurarea unui transfer optim al umidității se recomandă o viteză a aerului cuprinsă între 2 și 4 m/s. În medie, pentru fiecare 100 kg de produse este necesar un consum de energie electrică de 1.5 kWh pentru vehicularea aerului și pentru funcționarea sistemelor de control.

În cazul uscătoarelor cu pompa de caldura, randamentul este similar ca în cazul utilizării unui recuperator de caldura, dar trebuie avut în vedere că pompele de caldura funcționează în marea majoritate a cazurilor cu energie electrică, care poate fi de regula de 3 ori mai scumpă decât energia termică produsă prin arderea combustibililor sau deșeurilor, astfel un randament mai ridicat nu înseamnă automat și economii financiare. Tot în cazul acestor utilaje trebuie avut în vedere faptul că achiziția, întreținerea și reparația acestor utilaje sunt mult mai costisitoare decât în cazul utilizării unei instalații clasice. Aceste utilaje pot fi folosite în cazul unor produse scumpe sau sensibile la caldura cum este cazul catinei care se usuca la maxim 40 °C, deoarece peste această temperatură sunt distruse caracteristicile cautate în produsul final.

Aceste utilaje pot fi folosite cu mai mult succes în perioada caldă decât în perioada rece. Acest lucru se datorează faptului că în perioada verii, dacă se dorește uscarea unor produse la 40 de grade și aerul proaspăt atmosferic are 30-35 grade și o umiditate relativă de 70-80%, acest tip de utilaj poate reduce conținutul de umiditate al aerului în așa fel încât procesul să decurgă corespunzător, lucru care nu se întâmplă în cazul uscătoarelor clasice. Totuși, în zonele montane și de deal din România pot fi folosite cu succes în marea majoritate a timpului instalațiile clasice de uscare.

Pentru o instalație care funcționează cu un consum termic de 1.4 kWh / kg apă evaporată consumul pentru diferite tipuri de combustibil raportat la 100 kg de apă evaporată este:

Nr. Crt.	Tipul combustibilului	Consum raportat la 100 kg de apă evaporată
1	Electric	140 kWh
2	Gaz (38 MJ/mcN ~ 10 kWh / mcN)	14 mcN

3	Lemn de foc (1800 kwh / mc ~ 4.2 kwh / kg)	0.08 mc sau 34 kg
4	Peleti (5.3 kwh / kg)	27 kg
5	Tocatura lemn (4 kwh / kg)	35 kg
6	GPL (25.8 kwh / mc)	5.5 mc
7	Motorina (11.8 kwh / kg)	12 kg
8	Carbune (15...25 MJ/kg ~ 4.1...7 kwh / kg)	34...20 kg
9	Solar (1...1.4 kwh / mp)	14...10 mp panouri *

*calcul pentru un proces care dureaza 10 ore.

Uscarea este una dintre cele mai vechi forme de conservare a fructelor si legumelor. Prin uscare se reduce continutul de apa al produsului in scopul conservarii acestuia dar de asemenea pentru reducerea masei si volumului acestora, a costurilor cu ambalarea, stocarea si transportul [4].

In vederea uscarii produsele vor fi selectate, curatate, taiate, si li se pot aplica unele tratamente premergatoare cum ar fi blansarea (oparirea). Prin blansare se opresc reactiile enzimatice, sunt distruse microroganismele daunatoare si se reduce timpul de uscare. Uneori produsele sunt tratate cu o solutie de dioxid de sulf pentru conservarea culorii si reducerea pierderii carotenului, al acidului sorbic. In vederea pastrarii nutrientilor si vitaminelor s-au dezvoltat tehnologii de uscare la rece, aceste echipamente sunt mult mai scumpe si complexe decat sistemele clasice prin convecție si in general acest procedeu se foloseste in industria farmaceutica. Dupa uscare, produsele sunt ambalate si pot fi stocate la temperaturi cuprinse intre 10 si 25 grade celsius, in functie de continutul final de umiditate si destinatia acestora.

Conservarea prin refrigerare spre deosebire de uscare pastreaza o parte importanta a nutrientilor, dar produsele vor trebui stocate la temperaturi scazute pe toata perioada conservarii, pana cand acestea vor fi folosite, lucru care implica costuri mult mai ridicate dect in cazul uscarii.

Prelucrarea prin pasteurizare si sterilizare (producerea de conserve, compoturi, gemuri, dulceturi si alte produse finite) reprezinta un procedeu de

conservare care duce la produse cu un termen de valabilitate al produselor mare cat si la produse cu o valoare adaugata ridicata.

Achizitia unui utilaj pentru uscare trebuie gandita bine, deoarece caracteristicile acestuia influenteaza atat fluxul tehnologic cat si costurile initiale ale unei afaceri de acest gen.

Dimensionarea utilajului porneste de la cantitatea de produs uscat care trebuie produsa sau proaspat care se doreste a fi uscat. In cazul in care pornim de la cantitatea de produs uscat trebuie sa calculam masa produsului proaspat care va fi supusa procesului, pentru a putea dimensiona apoi suprafata de uscare, generatorul termic si restul elementelor de executie.

Dupa dimensionarea suprafetei de uscare, se alege dimensiunea tavilor si modul de amplasare al acestora. Pentru un numar ridicat de tavi, cazul uscatoarelor cu o capacitate de peste 200 kg de produs proaspat, se vor utiliza carucioare pentru un transport mai facil al produselor.

Alegerea generatorului termic se va face in functie de disponibilitatea sursei de energie si puterea necesara. In unele cazuri acesta va fi utilizata pentru mai multe uscatoare, pentru alte procese tehnologice sau pentru incalzirea spatiilor de productie, astfel puterea necesara va fi mai mare decat cea destinata uscatorului.

Indiferent de procedeul de conservare ales, este important sa se ajunga la productia de produse finite destinate consumatorilor, care sa conduca la obtinerea unui profit ridicat, benefic atat pentru companie cat si pentru zona in care aceasta isi desfasoara activitatea, prin crearea de locuri de munca.

Nota: sectiuni din acest articol au fost publicate de catre autor in urmatoarele reviste de specialitate: Analele Facultatii de Inginerie din Hunedoara, INMATEH, Buletinul Stiintific UPB

5.9 Opărirea sau blanșarea

Scopul principal al opăririi fructelor si legumelor constă în inactivarea tuturor enzimelor prezente și în special al enzimelor oxidative, care sunt cele mai termorezistente. Opărirea se face cu apă fierbinte (în care se pot dizolva eventual anumite substanțe chimice) sau cu aburi.



Figura 36 - Preparare caise pentru uscare

În timpul opăririi se produc o serie de fenomene a căror intensitate variază cu condițiile în care se execută operația și care pot fi favorabile sau defavorabile calității produselor finite.

Dintre efectele favorabile, în afara celor referitoare la inactivizarea enzimelor, se menționează distrugerea formelor vegetative ale microorganismelor și eliminarea aerului din țesuturi, care are ca urmare fixarea, menținerea și chiar accentuarea culorii produselor finite, precum și fixarea și păstrarea vitaminei C în timpul proceselor următoare.

În general, microorganismele care supraviețuiesc opăririi sunt puternic termorezistente. Se impune deci o primenire permanentă a apei de opărire, având în vedere că acumularea microorganismelor termorezistente, în cazul opăririlor în aceeași apă, poate provoca infectarea întregului lot de material, supus opăririi.

5.9.1 Efectle oparirii inainte de uscare

Dintre alte efecte favorabile ale opăririi se menționează :

1. reducerea timpului pentru uscare, deoarece contribuie la accelerarea evaporării ulterioare a apei din țesuturi ;
2. îndepărtarea particulelor de amidon de pe suprafața bucăților de material supuse uscării (cartofi) ;
3. prevenirea obținerii unui gust neplăcut, caracteristic desfășurării în continuare a proceselor enzimatic ;
4. favorizarea rehidratării produsului finit.

În ceea ce privește efectele defavorabile ale opăririi, trebuie menționate în primul rând pierderile de substanțe solubile în apa de opărire (zaharuri, săruri minerale, vitamine etc.).

Aceste pierderi variază în funcție de condițiile de opărire și în special de durată, temperatură, gradul de mărunțire și de raportul dintre cantitatea de apă și cantitatea de material supus opăririi.

Orice mărire a timpului și temperaturii de opărire duce la creșterea considerabilă a pierderilor de extract solubil, inclusiv de vitamina C, provocând în același timp și o înmuiere excesivă a țesuturilor. Acest lucru are ca rezultat o scădere a însușirilor organoleptice și valorii alimentare a produselor obținute.

Din aceste motive, la stabilirea regimului de opărire se va avea în vedere ca temperatura și timpul de opărire să fie strict limitat la cel necesar inactivării enzimelor oxidative care sunt cele mai termorezistente.

5.10 Soluții de stocare a energiei în uscătorul solar

O provocare semnificativă cu care se confruntă uscătoarele solare este natura fluctuantă a radiațiilor solare, deoarece soarele nu ramane constant pe tot parcursul anului. Reducerea radiațiilor solare cauzată de condiții înnorate sau ploioase afectează semnificativ performanța uscătoarelor solare, ceea ce duce la produse de calitate scăzută și la un risc crescut de deteriorare [12]. Pentru a depăși această problemă, este necesar să se integreze soluții de stocare a energiei în uscătorul solar. Acest lucru permite menținerea nivelurilor de temperatură și continuarea procesului de uscare chiar și în perioadele de radiație solară redusă. Unii cercetători au studiat utilizarea materialelor precum piatra, nisipul, oțelul turnat, fonta, cărămizile, sarea etc., ca o soluție de stocare a energiei termice. Aceste materiale au fost încălzite pentru a stoca excesul de energie solară care poate fi folosit pentru uscare în absența radiațiilor solare [13]. De asemenea, unitățile de stocare a energiei termice latente sub formă de materiale cu schimbare de fază (PCM) pot fi utilizate în uscătoarele solare. Cercetătorii anteriori au folosit cu succes materialele cu schimbare de fază (PCM) ca unități de stocare a energiei termice în uscătoarele solare de tip direct și indirect. Această integrare s-a dovedit extrem de benefică, rezultând timpi de uscare reduși, performanțe îmbunătățite și eficiență termică îmbunătățită a uscătoarelor solare, chiar și în condiții meteorologice dificile sau în timpul nopții [[14], [15], [16], [17]].

S-a observat că utilizarea soluțiilor de stocare a energiei termice în uscătoarele solare crește eficiența termică și reduce timpul de uscare.

Având în vedere costul redus de instalare, costul zero al energiei, impactul spațial redus, acceptarea favorabilă a publicului și obținerea unui produs cu calitate acceptabile, uscătorul solar realizat manual este un sistem benefic din punct de vedere ecologic și socioeconomic care caracterizează activitatea ca model de afaceri inovator pentru producătorii mici și mijlocii.

5.11 Parametrii pentru uscarea fructelor cu energie solara

Leon și colab. . (2002) a prezentat o revizuire a metodelor de evaluare existente și parametrii luați în considerare în general pentru uscarea fructelor cu energie solara. Acești parametri pot fi clasificați astfel:

- caracteristici fizice ale uscătoarelor;
- performanța termică;
- calitatea produsului uscat;
- costul de uscător și perioadă de amortizare.

5.11.1 Caracteristicile fizice ale uscătorului:

- Tipul, dimensiunea și forma.
- Zona colectorului și deschiderea solară.
- Capacitate de uscare/densitate de încărcare (kg/unitate de deschidere).
- Suprafața tăvii și numărul de straturi.
- Comoditate de încărcare/descărcare.
- Timp de încărcare/descărcare.
- Manipulare, curățare, întreținere și ușurință de construcție.

5.11.2 Performanță termică:

- Timp de uscare/rată de uscare până la 10% conținut de umiditate a produsului (Db.), (acest
- pot varia, totuși, de la produs la produs).
- Eficiență de uscare/uscarea până când conținutul de umiditate a produsului ajunge la 10%
- (Db.).
- Eficiență de uscare în prima zi.
- Temperatura aerului de uscare și umiditatea relativă.
- Temperatura maximă de uscare fără sarcină și cu sarcină.
- Durata temperaturii aerului de uscare 10°C peste temperatura ambientală.
- Debitul de aer.

5.11.3 Calitatea produselor uscate:

- calitate senzorială (culoare, aromă, gust, textură, aromă)
- Atribute nutriționale - cuantificate pentru o comparație ușoară
- capacitate de rehidratare - consistență în prezentare
- uniformitatea uscării

Capitolul 6 - Solutii de uscatoare solare

6.1 Uscător solar cu convecție naturala

Cel mai simplu concept pentru uscarea solară indirectă este un uscător alcătuit numai dintr-o cameră de uscare în care pătrunde aerul din mediul înconjurător (fig.2.6). Un acoperiș, impermeabil la lumină, protejează produsul împotriva efectelor radiației directe. Acest uscător este însă foarte dependent de starea aerului din mediul ambiant. Din acest motiv, uscătorul solar cu convecție naturală nu este indicat pentru uscarea produselor ușor perisabile, deoarece uscarea poate dura foarte mult în cazul în care aerul este prea umed.

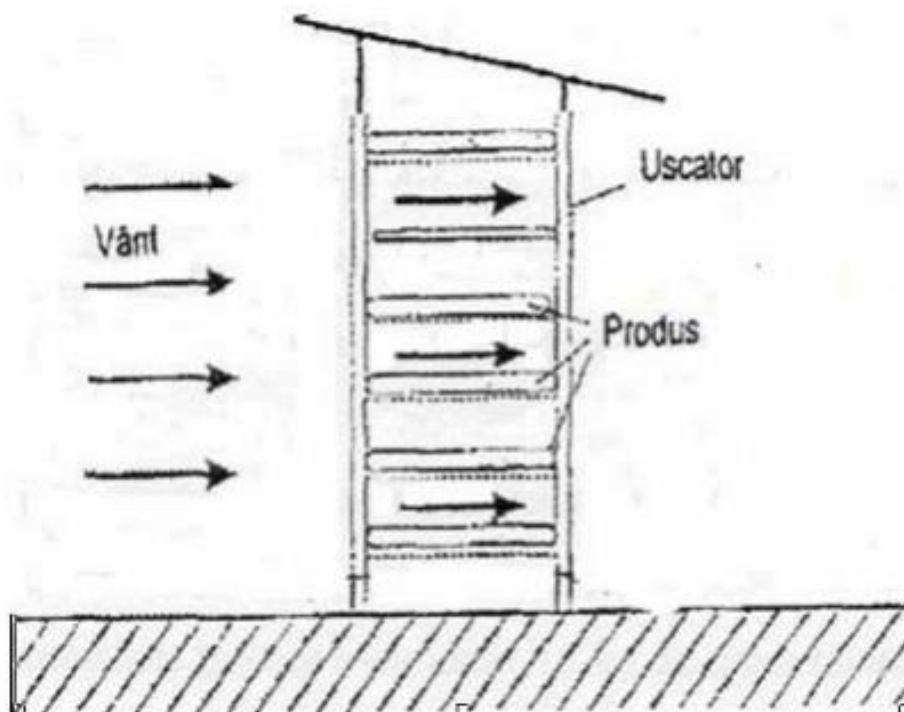


Figura 37 - Uscător solar cu convecție natural

6.2 Uscătorul solar de tip tunel model Hohenheim

Uscătorul solar tip tunel model Hohenheim este alcătuit dintr-un colector solar plat acoperit cu o folie de plastic transparentă, un tunel de uscare, un panou fotovoltaic și două ventilatoare axiale, după cum se poate observa în figura 2.7. Pentru simplificarea construirii și pentru a reduce costurile de producție, colectorul solar este conectat direct la tunelul de uscare, fără alte canale auxiliare de dirijare a aerului. Atât colectorul solar cât și uscătorul propriu-zis sunt montate pe suporti metalici având înălțimea de 1 m, pentru a ușura manipularea în timpul încărcării și a descărcării produselor din uscător. Datorită designului modular,

lungimea tunelului de uscare poate fi mărită până la 20 m pentru uscarea produselor în regiuni mai aride.

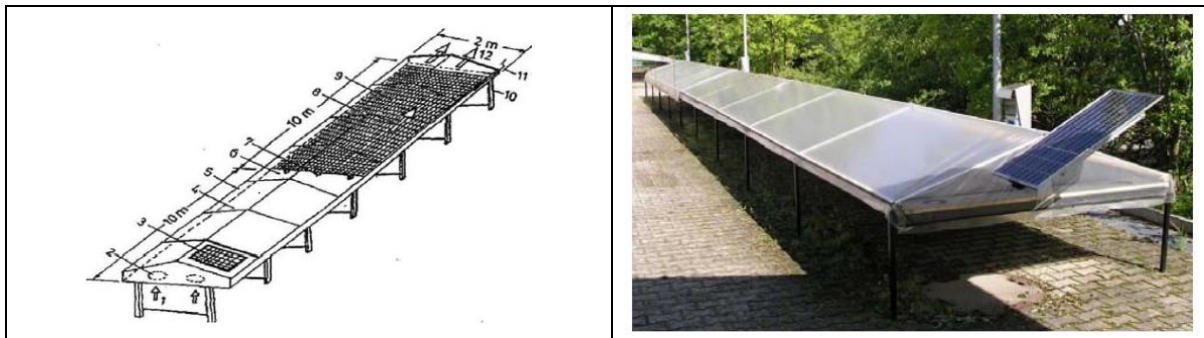


Figura 38 Uscător solar tip tunel model Hohenheim

6.3 Echipamente pentru uscarea legumelor și fructelor realizate în România

P e plan national, lider in cercetarea echipamentelor si elaborarea de tehnologii inovative in domeniul conservarii prin uscare-deshidratare in regim economic a produselor vegetale, este Centrul de Cercetare si Proiectare MIRACO Bucuresti.

Camerele de uscare produse de firma MIRACO SRL Bucuresti, destinate valorificarii prin deshidratare a productiei excedentare din marile bazine legumicole si pomicole, cu extensie si pentru deshidratarea produselor de origine animala (carne, peste, branza), au capacitati etalon de 250, 500 si 1000 kg produs de uscat/sarja.

De asemenea, produce doua camere de uscare de capacitate mai mica:

- o camera de uscare cu capacitatea de lucru de 200 kg produs de uscat/sarja;
- o camera de uscare cu capacitatea de lucru de 100 kg produs de uscat/sarja.

Camera de uscare cu capacitatea de lucru de 200 kg produs de uscat/sarja. Energia electrica necesara functionarii diferitelor subansamble este furnizata de un generator electric cu puterea de 2,5 kW.

Camera de uscare cu capacitatea de lucru de 100 kg produs de uscat/sarja, apropiata din punctul de vedere al capacitatii de lucru cu uscatorul propus in proiect, este echipata cu 64 navete (695 mm x 300 mm x 60 mm), 1,56 kg/naveta.

Durata medie a ciclului efectiv de uscare legume-fructe cu blansare si/sau centrifugare este de 6,4 h/ciclu si sarja; raport mediu kilograme produs proaspat/kg produs uscat : 8,3 kg; puterea electrica instalata : 1,75Kw, cu alimentare de la rețeaua de energie electrica 380 V/220 V (cu adaptor); consumul mediu de energie termica este de 7.740 Kcal/h (in echivalent cu 9 kwh termici);

Pentru ambele tipuri de camere de uscare prezentate, agentul termic este aerul cald, produs în două trepte de conversie: gaze de ardere-apa caldă, respectiv apa caldă-aer cald, de un generator termic pe biomasa cu ardere directă, cu randament inferior generatorului termic cu gazeificare tip TLUD, cu schimbător de căldură gaze arse-aer cald din componenta echipamentului propus prin proiect (se elimină o treaptă de conversie a energiei termice).

6.3.1 Camera de uscare – deshidratare MIRACO (175kg/șarjă) (www.uscatoare.ro)

Camera de uscare-deshidratare de 175 kg/șarjă cu flux ascendent - descendent, se bazează pe o nouă soluție inventivă de echipare și pe un nou procedeu inventiv de funcționare. Procedul înlătură dezavantajele camerelor de uscare sau al uscătoarelor cunoscute, prin faptul că fluxul de aer este recirculat intermitent prin interspațiile materialului supus uscării în navetele grătar din policarbonat, de niște agregate de preparat și vehiculat aer cald ca agent de uscare, optimizat la o temperatură, umiditate, viteză, presiune și debit care sunt controlate în regim automat (fig. 2.8).



Figura 39 Camera de uscare – deshidratare MIRACO (175kg/șarjă)
(www.uscatoare.ro)

6.3.2 Uscătorul casnic pentru legume și fructe cu casete

Aceste uscătoare oferite de compania UCI Focșani, sunt dotate cu un sistem de reglaje utilizate pentru eliminarea aerului umed, fapt ce permite optimizarea uscării și a consumului energetic, eliminând mai mult sau mai puțin aerul, în funcție de condițiile de lucru și tipul de produs aflat în uscare. Acest uscător asigură un proces de uscare într-un mod complet natural, prin ventilarea alimentelor cu aer cald. Uscarea este uniformă și mai ales rapidă, datorită faptului că aparatul poate funcționa zi și noapte în toate cele 365 de zile ale anului. Se pot

usca atât fructe și legume, cat si ciuperci. Uscătorul, fig. 2.9, este realizat dintr-un plastic foarte dur și este dotat cu un ventilator prevăzut cu rezistență electrică și termostat ce asigură reglarea directă și eficientă a consumului. Aparatul este disponibil în două variante: B5 cu 5 sertare sau B10 cu zece sertare de uscare. Capacitatea poate fi suplimentată cu încă zece sertare printr-un modul suplimentar ce poate fi atasat ulterior. Capacitatea de uscare variază de la 2 până la 12 kg.



Figura 40 Uscător casnic de fructe și legume cu casete (sursa: www.ucifocsani.ro)

6.3.3 Uscător-deshidratator profesional pentru fructe, legume, ciuperci

Uscătorul model BM al companiei UCI Focșani (fig. 2.28) cuprinde toate caracteristicile unui uscător profesional cu toate că se adresează unor productivități medii. Poate conține 40 planuri de uscare într-un modul (cu suprafața de uscare maximă de 14 m^2 și o capacitate maximă de încărcare de 160 kg) sau 72 de planuri (cu suprafața de uscare maximă de 25 m^2 și o capacitate maximă de încărcare de 300 kg). Data fiind construcția modulară, această capacitate poate fi oricând mărită prin adăugarea de module suplimentare la aceeași unitate de procesare. Uscătorul este dotat cu un sistem de furnizare a aerului încălzit de până la 65°C cu o putere instalată de 5,1 kW.



Figura 41. Uscătorul model BM pentru fructe, legume, ciuperci (sursa: www.ucifocsani.ro)

6.4 Echipamente pentru uscarea produselor vegetale realizate la nivel mondial

La nivel mondial, dintre companiile cu interese semnificative în domeniul uscătoarelor convective pot fi menționate companiile: Hohenheim-Germania, BUNA-Moldova, ImTech DryGenic-Olanda, COMMERCIAL DEHYDRATOR INC-SUA.

6.4.1 Mini-uscătorul tip Innotech – Hohenheim (fig. 2.29)

Acest tip de uscător este produs de compania Prody-Solar Germania, fiind potrivit pentru uscarea fructelor, legumelor, semințelor și plantelor medicinale pentru uz gospodăresc dar și pentru mica industrie sau secțiile de cercetare – dezvoltare. Caracteristicile tehnice ale acestui uscător sunt prezentate în tabelul 4.



Figura 42 Mini-uscătorul tip Innotech – Hohenheim (sursa: www.prody-solar.de)

Tabelul 4. Caracteristicile tehnice ale mini-uscătorului tip Innotech – Hohenheim(www.prody-solar.de)

Caracteristica	Valoare
Putere energetică/calorică	1,5 kW
Ventilator radial-turbionar (asigură o curgere laminară a aerului. Se pretează la volume mari și uniforme de aer circulat.)	100 W, 230 V, 50 Hz
Suprafață de uscare	0,9 m ²
Reglarea temperaturii interioare	până la 80°C
Timpul de reglare	24 de ore
Capacitatea maximă de uscare	10 kg
Rafturi de uscare	6 bucăți 32x47 cm
Material părți exterioare inclusiv ușă	DUROPOL HPL
Dimensiuni (L x l x h)	680 x 660 x 600 mm
Greutate	77 kg
Putere energetică/calorică	1,5 kW

6.4.2 Uscătorul pentru produse vegetale Mat-ing, Moldova (fig. 2.30)

Uscătoarele pentru produse vegetale fabricate de compania BUNA Moldova sunt uscătoare tip tunel de capacitate mare. Clasificarea acestor uscătoare se poate face în funcție de capacitatea de lucru astfel:

- modelul C3000 cu o capacitate de 3000 kg produs proaspăt din care se pot obține până la 750 kg produs uscat;
- modelul C6000 cu o capacitate de 6000 kg produs proaspăt din care se pot obține până la 1500 kg produs uscat;
- modelul C10000 cu o capacitate de 10000 kg produs proaspăt din care se pot obține până la 2500 kg produs uscat.



Figura 43. Uscător pentru produse vegetale Mat-ing (sursa: www.6559.md.all.biz.ro)

6.4.3 Uscătorul tip tunel cu bandă ImTech DryGenic, Olanda (fig. 2.31)

Uscătorul produs de compania ImTech DryGenic Olanda este un uscător tip tunel de capacitate mare care oferă produse de calitate bună obținute în condiții controlate de temperatură și umiditate, menținând în același timp raportul optim între costurile și productivitatea procesului. Aceste uscătoare pot fi folosite pentru uscarea mai multor tipuri de produse, de la produse vegetale până la pește și carne [124]. Uscătoarele ImTech DryGenic oferă durabilitate, igienă, fiabilitate, controlul temperaturii și al umidității în funcție de programul ales și posibilitatea optării pentru programe de uscare diferite pe fiecare nivel, independente de condițiile de admisie a aerului. Cererea actuală de produse deshidratate de foarte bună calitate se referă în special la conținutul de substanțe nutritive care trebuie să fie similar cu cel din produsul proaspăt. În consecință, procesul de uscare ar trebui să aibă un cost redus și un efect minim asupra mediului înconjurător. Capacitatea, dimensiunile și performanța uscătorului depind de suprafața de transfer termic și de condițiile impuse pentru fiecare produs în parte. Combinațiile dintre ciclurile de temperatură și timpi de uscare pot fi ajustate astfel încât să poată fi controlate proprietățile fizice ale produsului final. Banda transportoare a uscătorului care încarcă materialul ce urmează a fi uscat este alcătuită din unul sau mai multe straturi din oțel inoxidabil. Deoarece agentul de uscare străbate banda, schimbul de căldură este complet, ducând astfel la creșterea eficienței

procesului și obținerea unor produse de calitate foarte bună. Produsul proaspăt poate fi încărcat pe banda transportoare cu ajutorul unor mecanisme auxiliare, cum ar fi distribuitorul, banda vibratoare, pulverizatorul sau granulatorul. Tunelul de uscare este împărțit pe zone, fiecare având temperatură diferită. Fiecare zonă este dotată cu un sistem de încălzire și circulare a aerului și dacă este necesar, și cu sistem de evacuare a aerului viciat. Când banda transportoare traversează o anumită zonă a tunelului, aerul cald pătrunde prin produs de sus în jos și de jos în sus, asigurând astfel o uscare uniformă. În funcție de produs, uscătorul poate fi echipat în zona de evacuare, cu o secție de răcire și un dispozitiv de vibrație pentru scăderea temperaturii produsului final în vederea ambalării...



Figura 44. Uscător tip tunel cu bandă (sursa: www.drygenic.com)

COMMERCIAL DEHYDRATOR INC-SUA produce și comercializează o gamă largă de uscătoare cu încălzire electrică, model Harvest Saver, cu suprafața utilă de deshidratare cuprinsă între 2,5- 31 m² , cu puteri instalate de 1,6 kW / m².

Compania a efectuat cercetări cu privire la uscătoarele convective folosind pentru obținerea energiei termice module de ardere directă a biomasei, realizând două modele, unul cu suprafața de uscare de 15 m² și unul cu suprafața de uscare de 60 m².

Capacitatea de uscare a camerelor de uscare prezentate nu este adecvată nevoilor procesatorilor de produse vegetale din zonele vizate de proiect (zone montane/izolate), care nu au posibilitatea de a introduce în procesul de fabricație

cantități zilnice mai mari de 100 kg de produs (masa loturilor recoltate zilnic fiind cuprinsă între 20 și 100 kg), în funcție de capacitatea de recoltare.

Pentru a păstra proprietățile fizico-chimice și organoleptice, este necesar ca prelucrarea acestor produse să se facă în termen de 24 de ore de la recoltare.

Pe piața din România sunt comercializate uscătoare de legume, fructe, ciuperci, plante aromatice și medicinale, de uz gospodăresc cu suprafețe de uscare mici (în jur de $0,4 \text{ m}^2$): LOUIS TELLIER, Fruit Jerky Plus 6- Klarstein, Biovita DELUXE-6/10, profesionale: Deca+ , cu suprafața de uscare de $1,5 \text{ m}^2$ (fabricat în România), Fruit Jerky 18 (cu suprafața de uscare de $2,4 \text{ m}^2$), Frutty 12 cu suprafața de uscare de $4,8 \text{ m}^2$, Frutty 25 cu suprafața de uscare de $5,9 \text{ m}^2$.

Aceste uscătoare utilizează atât pentru producerea agentului de uscare cât și pentru alimentarea ventilatorului, modului electronic, elementelor de execuție, energia electrică de la rețea.

6.5 Scheme clasice de uscătoare solare

Principiul de funcționare al unui uscător care funcționează cu energie solară este prezentat în fig 1 și fig 2

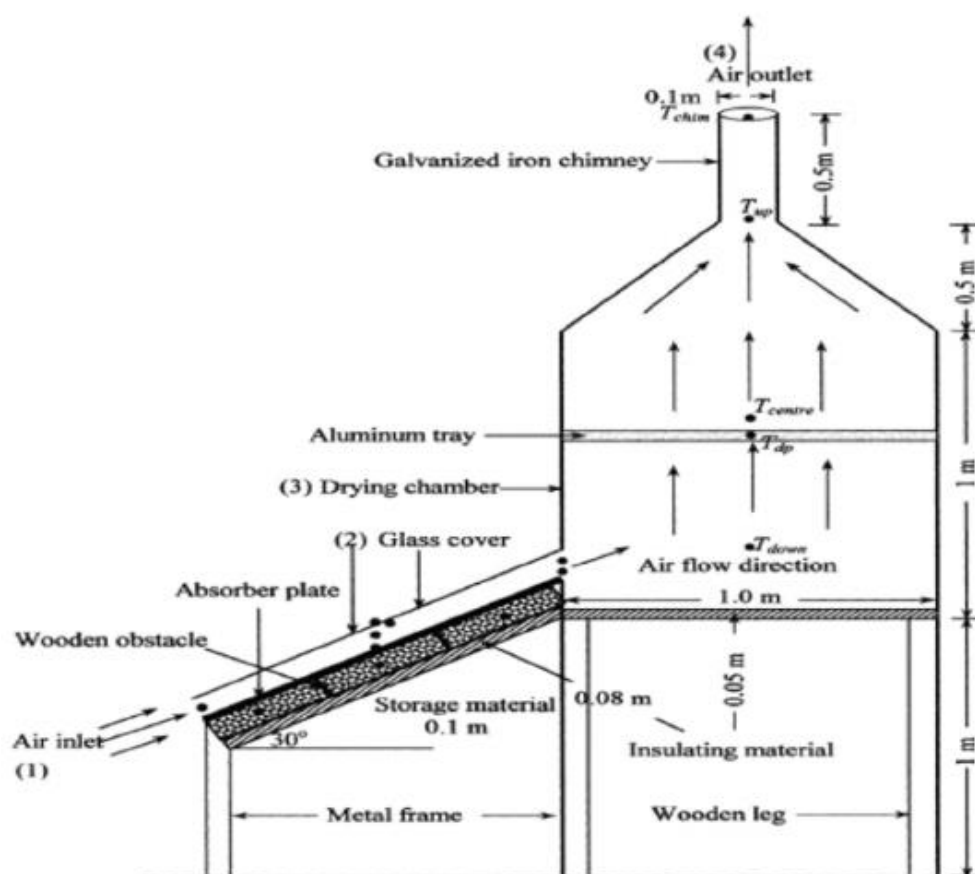


Figura 45. Principiul de funcționare al unui uscător care utilizează energie solară

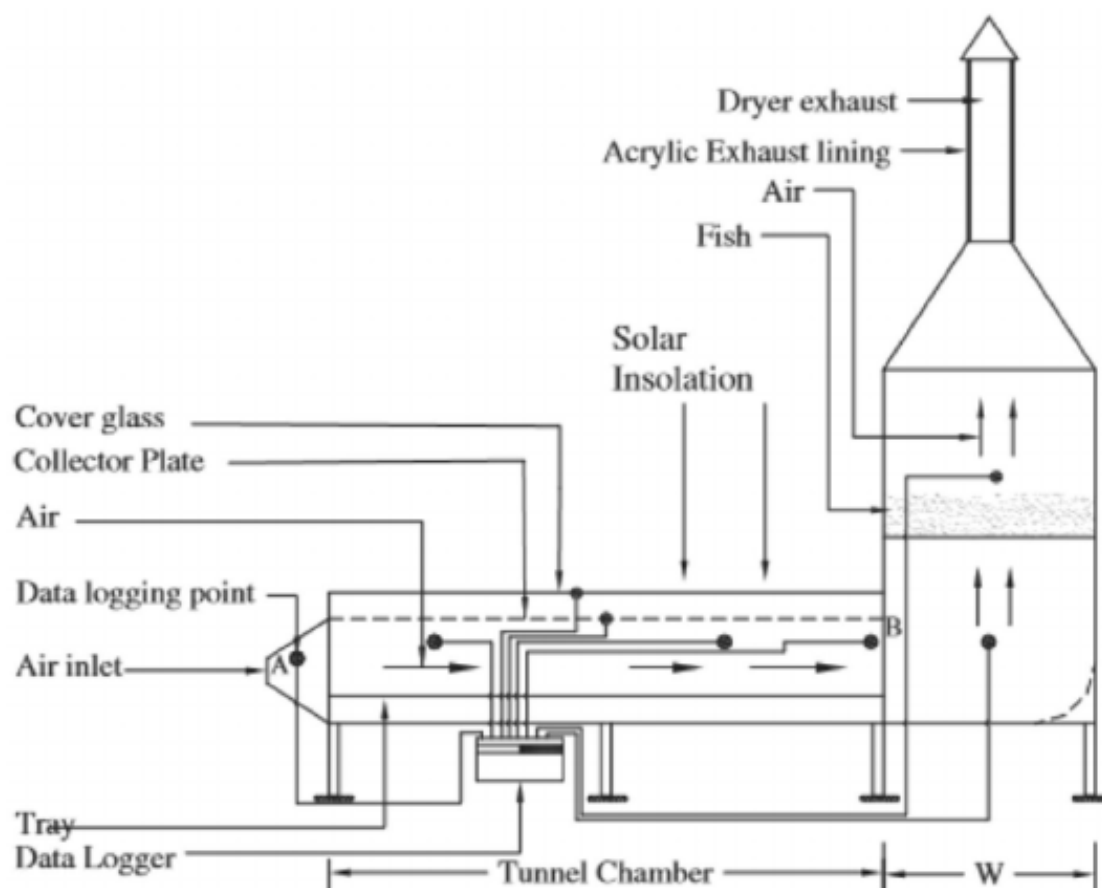
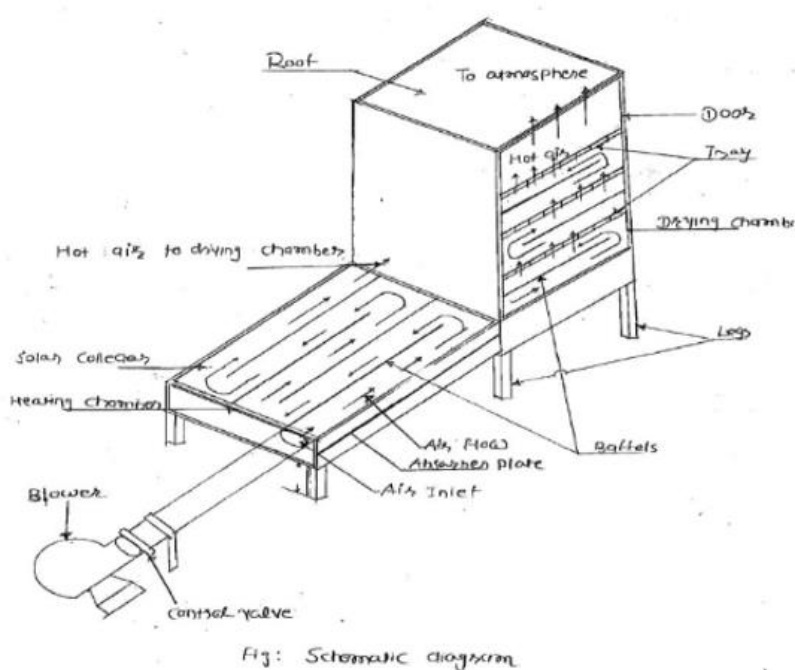


Figura 46 Un exemplu de proiect de uscator cu suflanta este prezentat in fig 46 si fig 47



Temperatura indentată
= 35-40°C

Temperatura de ieşire
= 75-80°C

Suflantă de aer
debit = 75 m³/Hr

Figura 47 Componenta uscatorului cu suflanta

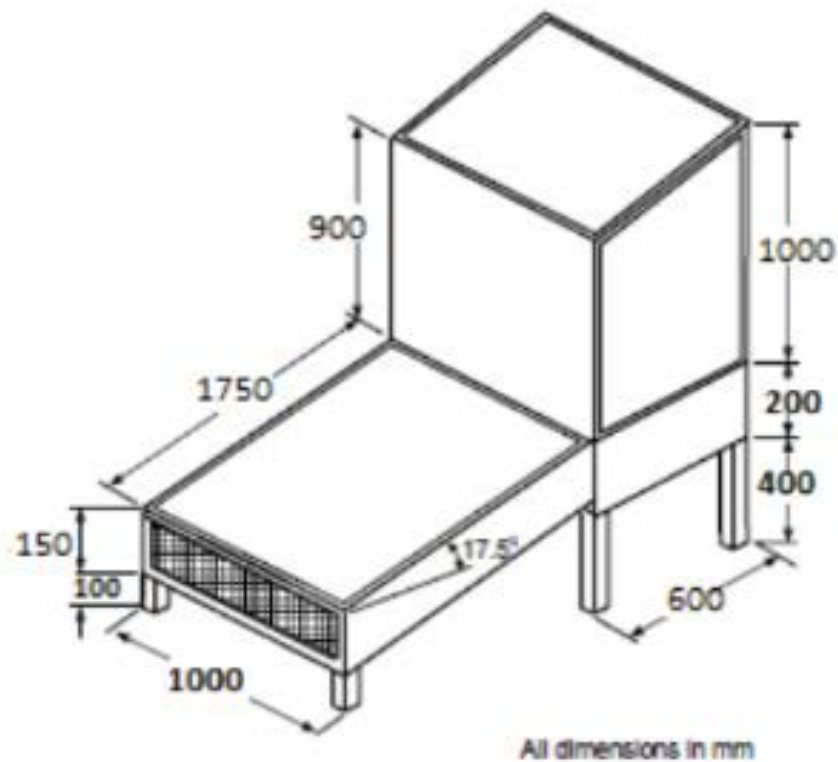


Figura 48. Din dimensiuni constructive uscator

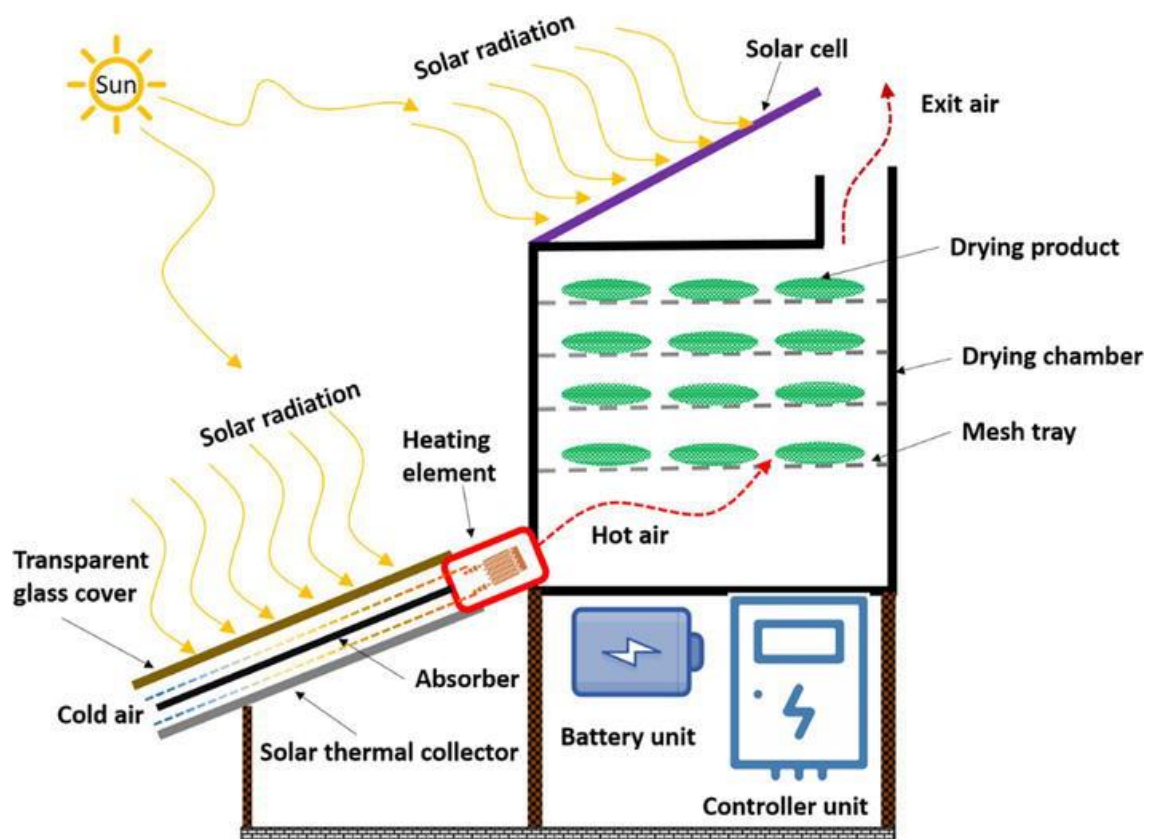


Figura 49. Schema de principiu a uscatorului solar

6.6 Exemplu de dimensionare si proiectare a unui uscator cu două compartimente

Uscătorul solar proiectat și construit este format din două compartimente sau camere integrate între ele, colectorul solar, care poate fi denumit și încălzitor de aer, și cameră de uscare, concepută pentru a găzdui trei straturi de tăvi de uscare pe care produsele (sau fructele) sunt așezate pentru uscare.

În acest uscător solar construit, efectul de seră și termosifonul principiile sunt baza teoretică. Experimentul a fost făcut în luna Aprilie-mai, uscătorul a fost plasat afară cu colectorul orientat spre soare. Colectorul a fost fixat rigid pe uscător la un unghi de $17,5^\circ$ orizontală pentru a obține fasciculul aproximativ perpendicular de raze solare. Camera de uscare a fost încărcată cu chikoo și chipsuri de mere estimate să cântărească în medie 50 g de 6 mm și, respectiv, 5 mm grosime. Sub fără sarcină, temperatura aerul încălzit din interiorul uscătorului, camera colectorului și aerul înconjurător la interval de o oră, de la 9 dimineața la 6 seara, precum și în absența unui higrometru au fost utilizate două termometre pentru a măsura umiditate relativă, unde un termometru are senzorul învârtit cu un slab, cu slabul atingând apa într-un pahar pentru a obține bulbul umed temperatura, iar celălalt termometru a furnizat temperatura care dă temperatura bulbului uscat. Bulbul umed și uscat temperatura bulbului pentru a obține umiditatea relativă a diagramă psihometrică, aceasta se făcea la fiecare interval de o oră, începând de la 9am până la 6pm.

Un termometru digital a fost utilizat pentru măsurarea temperaturii în uscător solar, conținutul inițial de umiditate a fost măsurat folosind variația Pierdere în greutate a fost măsurată folosind un cântar electronic

6.6.1 Insolație pe suprafața colectorului :

O cercetare a obținut valoarea insolației pentru Abeokuta, adică media radiația zilnică H pe suprafața orizontală ca; [10]

$$H = 1350 \text{ W/m}^2$$

și raportul mediu efectiv al energiei solare pe suprafața înclinată față de cel de pe suprafața orizontală R as;

$$R = 1,0035$$

Astfel, insolația pe suprafața colectorului a fost obținută ca

$$E_{uc} = H_T = H_R = 1350 \times 1,0035 = 1354 \text{ W/m}^2$$

6.6.2 Determinarea suprafeței și dimensiunii colectorului:

Debitul masic al aerului M_{un} a fost determinată prin luarea debitului volumetric rată.

Astfel, debitul volumetric de aer $V'_{un} = 75 \text{ m}^3/\text{Hr}$.

$V'_{un} = 75/3600 = 0,02083 \text{ m}^3/\text{s}$.

Astfel, debitul masic de aer:

$M_a = V'_a \times \rho_{un}$

Densitatea aerului ρ_{un} este luat ca $1,21 \text{ kg/m}^3$

$M_{un} = 0,02083 \times 1,21 = 0,0252 \text{ kg/s}$

Prin urmare, zona colectorului AC

$UnC = (0,0252 \times 1005 \times 50)/(0,5 \times 1354) = 1,75 \text{ milioane}^2$

Lungimea colectorului solar (L) a fost luată ca;

$L = Ac/B = 1,75/1 = 1,75 \text{ m}$

Astfel, lungimea colectorului solar a fost luată ca aproximativ $1,75 \text{ m}$.

Prin urmare, suprafața colectorului a fost luată ca $(1,75 \times 1) = 1,75 \text{ m}^2$

6.6.3 Determinarea grosimii izolatorului de bază pentru colector:

Rata pierderii de căldură din aer este egală cu rata de conducere a căldurii prin izolație.

Următoarea ecuație este valabilă pentru acest scop a designului.

$$m_{un}C_p (T_0 - T_{eu}) = 10 \times K_{un}(T_{un} - T_a)/t_b$$

$K = 0.04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ care este conductivitatea termică aproximativă pentru Vată de sticlă.

$T_0 = 80^\circ\text{C}$ și $T_{eu} = T_{un} = 30^\circ\text{C}$ aproximativ

$m_{un} = 0.0252 \text{ kg/s}$

$C_p = 1005 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$

și $Ac = 1,75 \text{ m}^2$

$t_b = [0,04 \times 1,75 \times (80-30)]/[0,1 \times 0,0252 \times 1005 \times (80-30)] = 0,0270 = 2,70 \text{ cm}$

Pentru proiectare, grosimea izolatorului a fost luată ca fiind de 5 cm . Partea laterală colectorul era din lemn, pierderea prin partea colectorului era considerate neglijabile.

6.6.4 Pierderi de umiditate (M.L.):

$$M. L = (M_{eu} - M_f) / M_{eu}$$

Unde , M_{eu} = masa probei înainte de uscare

M_f = masa probei după uscare.

Pentru Chickoo :

$$M.L = (850 - 240) / 850 = 71.76 \%$$

Pentru banane:

$$M.L = (700 - 130) / 700 = 81,42 \%$$

Tăvile au fost realizate cu rame din lemn care permit circulația liberă a aerului în interior dulapul de uscare (cameră). Au fost utilizate trei tăvi cu o medie de

Distanța de 22,5 cm dispusă vertical unul peste altul, dimensiunea tăvii avea 50 × 86 cm.

Interiorul uscătorului solar de fructe a fost vopsit în negru pentru a promova absorbția energiei termice. Montați șase benzi de lemn pentru susținerea tăvilor. Faceți niște găuri în acoperișul camerei de uscare pentru a evacua căldura aer în atmosferă.

6.6.5 Proiectarea uscătorului cu cameră de stocare termică integrată

Camera de stocare termică a folosit ceară de parafină ca material cu schimbare de fază (PCM). Utilizarea parafinei îmbunătățește eficiența și eficacitatea uscătorului solar. Ea absoarbe căldura, făcând-o să se topească în orele de vârf ale soarelui. Apoi, în perioadele de lumină solară redusă, aceasta eliberează căldura stocată, permițând uscarea continuă a produsului. Uscătorul solar a uscat cu succes ceapa, caisele și mazărea, cu procente de eliminare a umidității de 69,6 %, 65 % și, respectiv, 75 % din masa totală.

Un uscător solar a fost proiectat pentru a avea 3 părți principale, adică colector solar de 1750 × 1000 × 150 mm, cameră de stocare termică de 1000 × 600 × 150 mm și cameră de uscare de 1000 × 1000 × 600 mm. O placă plată a fost folosită ca absorbant solar și pentru a încălzi aerul din colectorul solar. Un ventilator de 12v DC a fost conectat la partea laterală a colectorului solar. Acest

aer în timp ce trece prin colectorul solar devine fierbinte și se deplasează în unitatea de stocare termică. Ceara de parafină a fost folosită ca PCM și plasată în camera de stocare termică într-un tub care circulă în această unitate. Camera de uscare a fost proiectată chiar deasupra camerei de stocare termică pentru plasarea produselor care urmează să fie uscate.

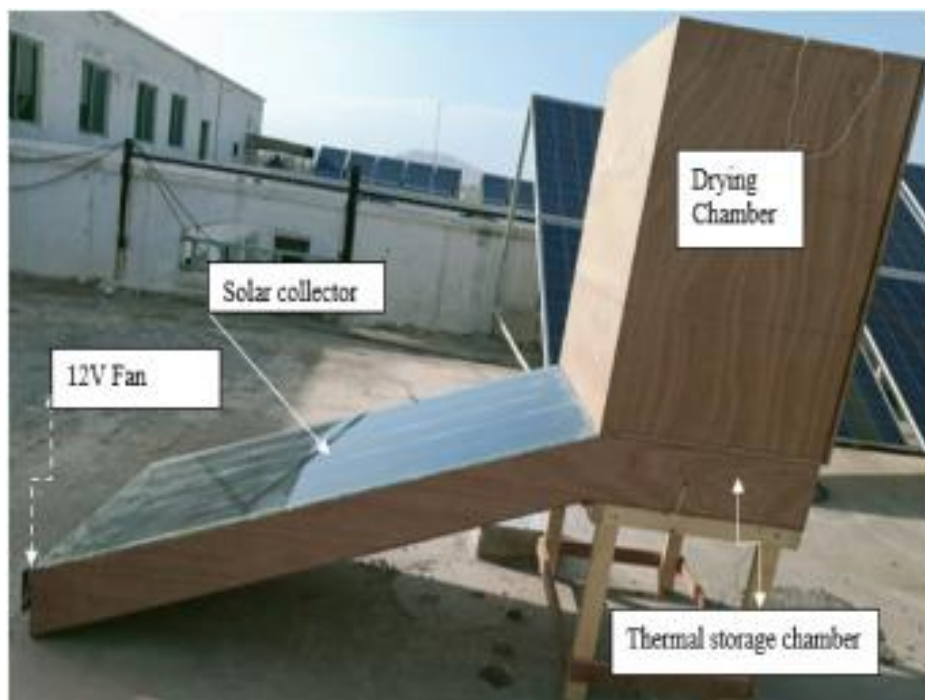


Figura 50. Configurație experimentală pentru uscător solar.

6.6.6 Principii constructive

Sistemul de uscător solar ar trebui să fie orientat spre soare la prânz. Iar colectorul solar a fost proiectat la 45° înclinat să absoarbă și să colecteze radiația maximă de la soare. Aerul din afară este suflat în colectorul solar, unde este încălzit din cauza căldurii produse de energia solară. O parte din căldura aerului provenit de la colectorul solar este consumată pentru încălzirea și topirea PCM, în timp ce căldura rămasă a aerului va usca produsele plasate chiar deasupra camerei de stocare termică din camera de uscare. Apoi aerul va părăsi camera de uscare printr-un orificiu de evacuare. Căldura latentă absorbită de ceara de parafină va fi folosită în orele fara soare pentru a usca continuu produsele. Procedând astfel, se va folosi energia termică maximă colectată de la soare și timpul de uscare va scădea.

6.6.7 Procedura experimentală

Termocuplurile (de la Omega Engineering cu temperatura de $\pm 0,1^\circ\text{C}$) au fost instalate la intrarea și ieșirea colectorului solar, în camera de stocare termică și în camera de uscare. Temperatura a fost înregistrată pe aceste poziții în uscătorul

solar și citirile au fost luate între orele 10 și 18. Citirile au fost făcute timp de cinci zile. În aceste zile 1 kg de ceapă a fost uscată timp de 2 zile, 1 kg de mazăre a fost uscată timp de o zi și 1 kg de caise au fost uscate timp de 2 zile. Greutatea produselor a fost măsurată la sfârșitul fiecărei zile pentru a calcula cantitatea de umiditate pierdută într-o zi. Un luxmetru (cu o eroare de $\pm 2\%$) a fost utilizat pentru a măsura radiația solară.

6.6.8 Rezultate

În prima zi de experimentare, ceapa de 1 kg a fost plasată în camera de uscare pentru uscare și ventilatorul de 12v DC a fost pornit pentru a sufla aer în uscătorul solar. Termocuplurile au înregistrat temperatura în timpul zilei, iar datele au fost stocate folosind un sistem de achiziție de date. Cantitatea de umiditate pierdută a fost calculată la sfârșitul zilei folosind ecuația (1).

$$(1) \text{Procentmoisturelost} = \frac{m_{\text{meu}} - m_{\text{fmeu}}}{m_{\text{meu}}} \cdot 100$$

După 5 ore de uscare, masa rămasă de ceapă a fost de 504 g și 49,6% umiditate s-a pierdut din ceapă. A doua zi, aceste 504 g de ceapă au fost uscate din nou timp de 4 ore, iar masa rămasă de ceapă a fost de 304 g. Ceea ce înseamnă că s-a observat 39,6% umiditate pierdută din masa rămasă a cepei. Fig. 2 ilustrează citirile de temperatură și radiația solară trasate în timp pentru prima zi de uscare a cepei, în timp ce Fig. 3 afișează aceiași parametri pentru a doua zi. Conținutul total de umiditate eliminat în ambele zile a fost de 69,6 % din masa inițială totală a cepei.

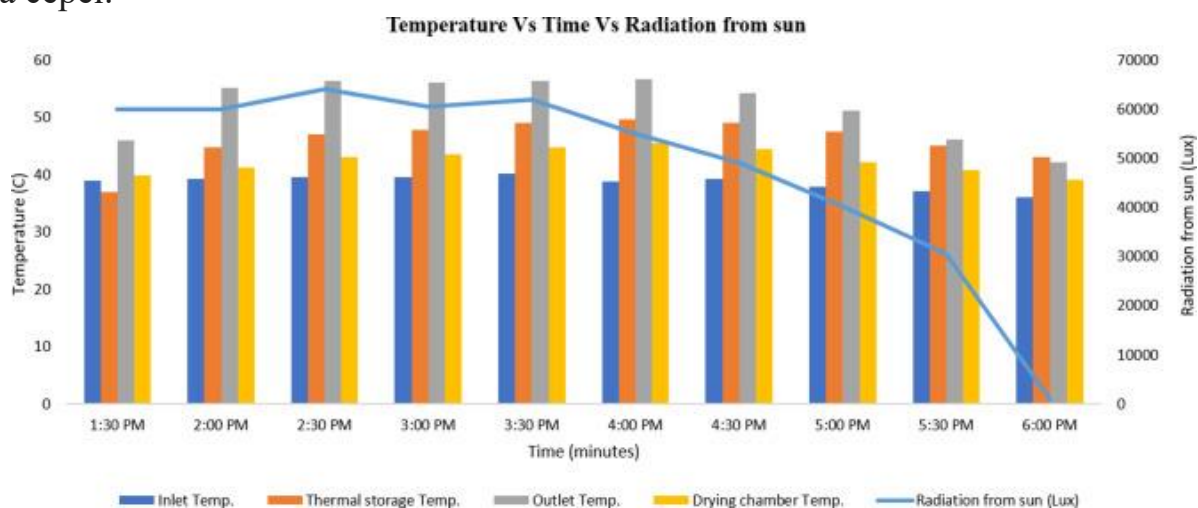


Figura 51. Uscarea cepei în ziua 1: temperatura (°C) și radiațiile de la soare (Lux) față de timp.

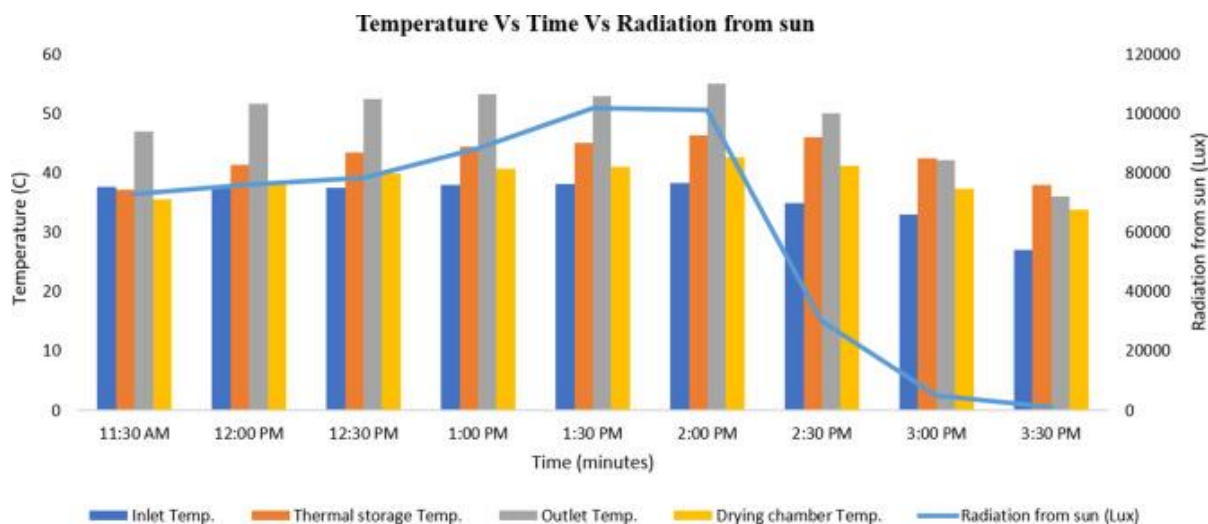


Figura 52. Uscarea cepei în ziua 2: temperatura (°C) și radiațiile de la soare (Lux) față de timp.

Apoi, a doua zi, 1 kg de caise au fost introduse în camera de uscare și uscate timp de 7 ore, iar umiditatea pierdută a fost măsurată folosind ec. (1) și rezultă a fi de 38,8%. Apoi masa rămasă de caise, adică 612 g, a fost uscată din nou în ziua 4 timp de 7 ore și 42,8% umiditate a fost îndepărtată din caise. Masa rămasă de caise după uscare în ziua 2 a fost de 350 g. Fig. 4 arată citirile de temperatură și radiația solară trasate în timp pentru prima zi de uscare a caiselor, în timp ce Fig. 5 prezintă aceiași parametri pentru a doua zi. Conținutul total de umiditate eliminat în ambele zile a fost de 65 % din masa inițială totală a caiselor.

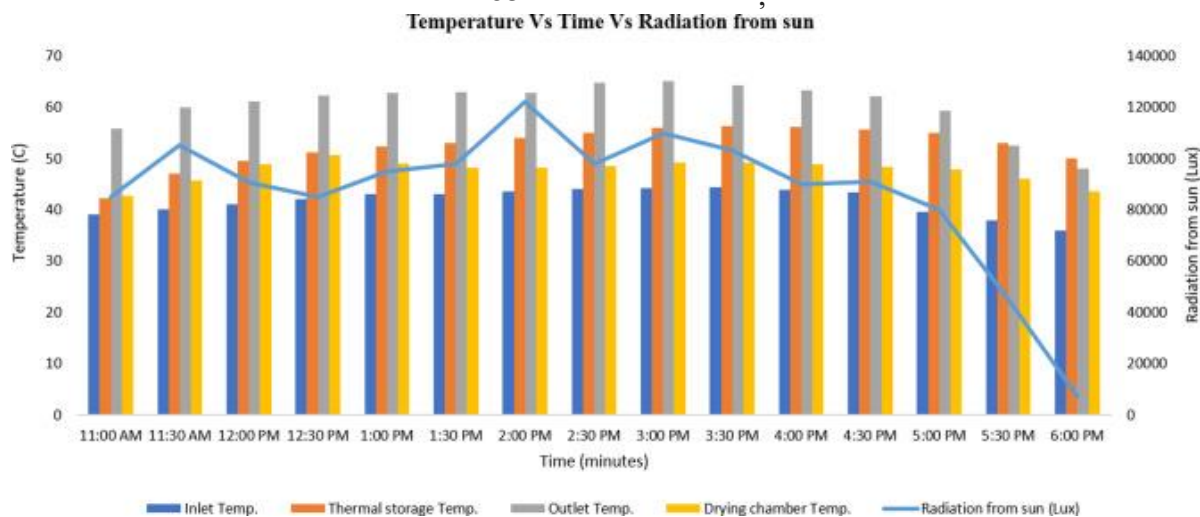


Figura 53. Uscarea caiselor în ziua 1: temperatura (°C) și radiațiile de la soare (Lux) față de timp.

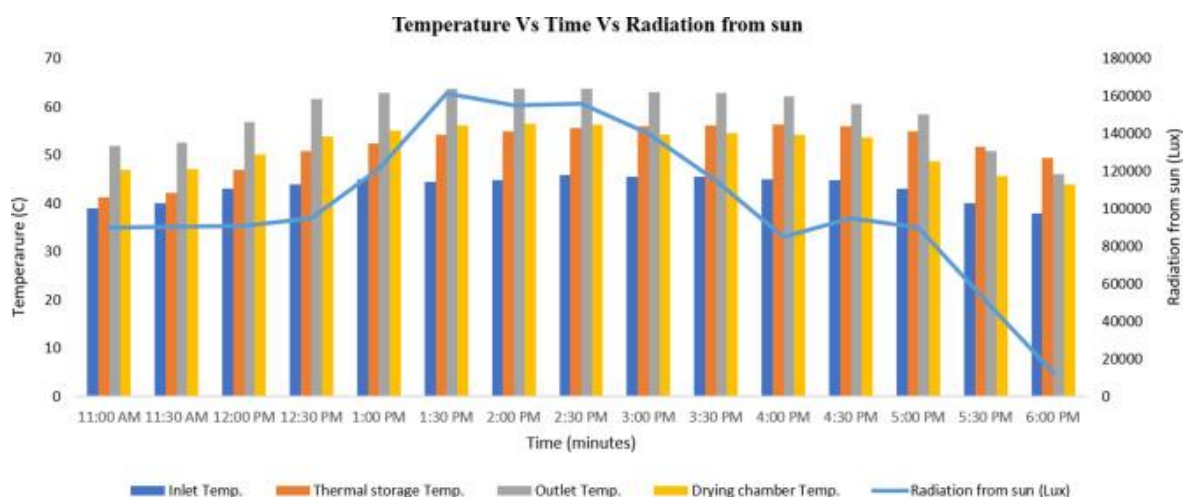


Figura 54 . Uscarea caiselor în ziua 2: temperatura (°C) și radiațiile de la soare (Lux) în funcție de timp.

Apoi 1 kg de mazăre a fost uscată într-o altă zi timp de 8 ore. Masa rămasă de mazăre și umiditatea pierdută a fost măsurată ca fiind de 250 g și, respectiv, 75 %. Fig. 6 afișează citirile de temperatură și radiația solară trasate în timp pentru uscarea mazărei.

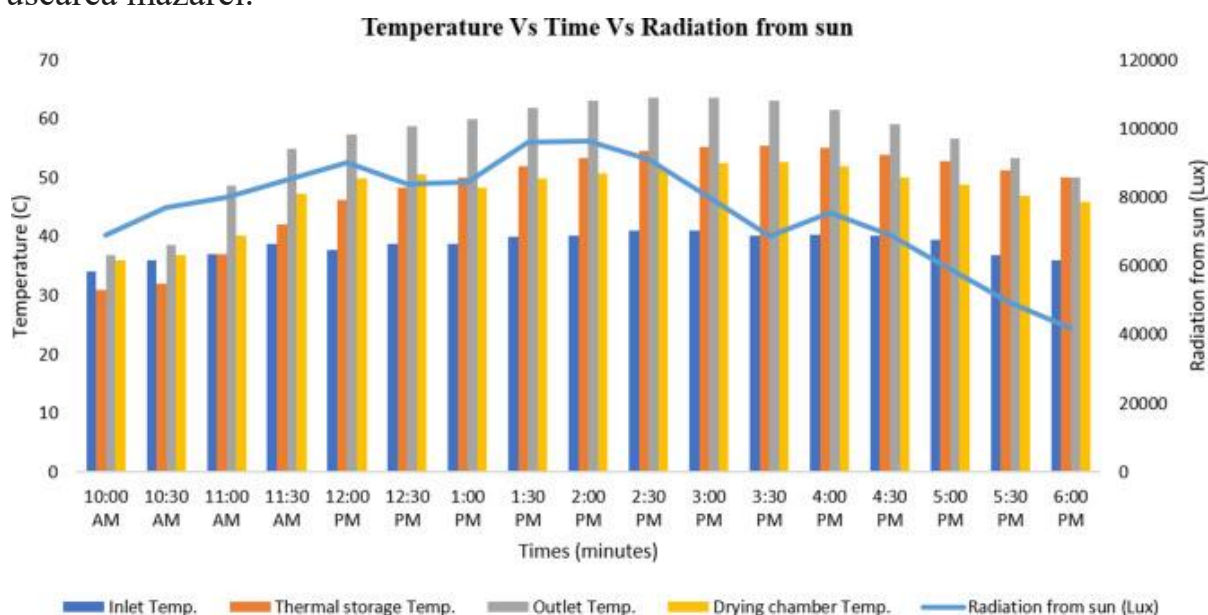


Figura 55. Uscarea mazărei: Temperatura (°C) și radiațiile de la soare (Lux) față de timp.

Analizând toate rezultatele experimentale, se poate concluziona că prezența PCM-urilor în camera de stocare termică ajută la menținerea temperaturii chiar și la sfârșitul zilei, când există mai puține radiații incidente pe colectorul solar. PCM s-a topit după ce a primit căldură prin aerul cald de la colectorul solar. În timpul orelor fara soare, PCM a devenit din nou solid prin transferul de căldură către uscator unde se va menține temperatura de lucru.

6.6.9 Exemplu de testare

Acest studiu a efectuat o analiză cuprinzătoare prin investigații experimentale pentru a examina funcționarea unui uscător solar de tip indirect, cu un mod de convecție forțată și o unitate de stocare termică integrată. Au fost efectuate experimente cu ceapă, mazăre și caise. S-a observat că aceste rezultate experimentale, adică valorile temperaturii, prezintă o corelație puternică cu căldura. Conținutul total de umiditate pierdut în timpul uscării produselor în acest uscător solar a fost observat a fi de 69,6 %, 65 % și, respectiv, 75 % din masa totală a cepei, caiselor și, respectiv, mazărei. Conținutul de umiditate pierdut a fost atribuit temperaturii atinse în camera de uscare. Temperaturile mai ridicate din camera de uscare vor duce la un proces de uscare mai rapid pentru produse. Eficiențe și mai mari pot fi obținute prin reducerea pierderilor de căldură din camera de uscare și printr-un control riguros al temperaturii și umidității din uscător.

Capitolul 7 - Condiții de uscare convectivă

7.1 Condiții de uscare convectivă pentru fructe

Tabelul 5.

FRUCTE	Condiții de uscare			Produs uscat		
	Încărcare medie (kg/m ²)	Temperatura aer la intrare (°C)	Timp de uscare (h)	Umiditatea finală (%)	Randament de uscare (%)	
					procedeu clasic	optimizat
Prune (întregi)	15	faza-I 40-50	6	18-20	25 – 35	30 -35
		faza-II 65-70	16			
Mere (rondele)	10	50 -65	5 - 8	20	10 -12	30
Pere jumătăți	15	60 - 70	15 - 22	18-20	18 – 20	30 - 35
Pere cuburi	15	60 - 70	10 - 15	15-20	15 – 20	30 -35
Caise (jumătăți)	10	60 - 70	10 - 15	15-20	10 -15	25 -30
Vișine (Intregi)	10	55 - 70	6 - 8	12-15	25	30 - 35

7.2 Condiții de uscare convectivă pentru legume

Tabelul 6.

LEGUME	Condiții de uscare			Produs uscat		
	Incărcare medie (kg/m ²)	Temperatura aer la intrare (°C)	Timp de uscare (h)	Umiditatea finala (%)	Randament de uscare (%)	
					procedeu clasic	optimizat
Morcovi	7	60 - 70	6 - 8	4 - 6	7	20-25
Ceapă	7	60 - 70	4 - 6	4 - 6	8 -10	20-25
Varză	6	60 - 70	3 - 4	4 - 7	4 - 6	10-12
Mazare verde	5	60 - 70	3 - 4	4 - 6	9 -14	20-22
Rădăcinoase albe	6-7	55 - 65	4 - 6	4 - 6	6 - 8	10-12
Praz	7	60 - 70	3 - 4	4 - 6	7 - 10	10-15
Legume cu frunză	4-5	55 - 65	3 - 4	6 - 8	5 - 7	15-20
Dovleac	7	60 - 70	5 -7	6 - 8	6	10-15
Ierboase	3-4	50 - 60	3 - 4	5 - 7	5 - 7	15-20

Capitolul 8 - Automatizarea instalatiilor pentru uscare

Sistemul de automatizare reprezinta in zilele noastre o necesitate pentru cresterea randamentului si scaderea costurilor intr-o lume tot mai competitiva. Sistemul de automatizare consta in 3 elemente principale: datele de intrare, prelucrarea datelor pentru controlul procesului si elementele de executie.



Figura 56 - Software automatizare uscator fructe

Datele de intrare sunt valori ale marimilor fizice preluate de catre diversi senzori si convertite in informatie compatibila cu un sistem informatic. In general in cazul instalatiilor de uscare marimile fizice utile sunt in ordinea importantei: temeperatura aerului, umiditatea relativa, temperatura produselor, masa produselor si viteza aerului. Cu ajutorul acestor valori ale parametrilor, un sistem de automatizare va lua decizii privind desfasurarea procesului.

Senzorii de temperatura pot fi de tip PT100/PT1000 sau termocuplu.

Pentru masurarea umiditatii relative pot fi folosite higrometre capacitive, resistive, etc. In unele cazuri senzorii de temperatura si umiditate se gasesc in aceeaasi carcasa.

Pentru masurarea masei produselor se foloses doze tensometrice amplasate fie in interior sau in exteriorul incintei, in functie de posibilitatea acestora de a lucra in mediul respectiv. Dozele de cantarire pot fi amplasate fie pentru cantarirea intregii cantitati de produse, fie pentru cantarirea unui esantion reprezentativ al cantitatii.

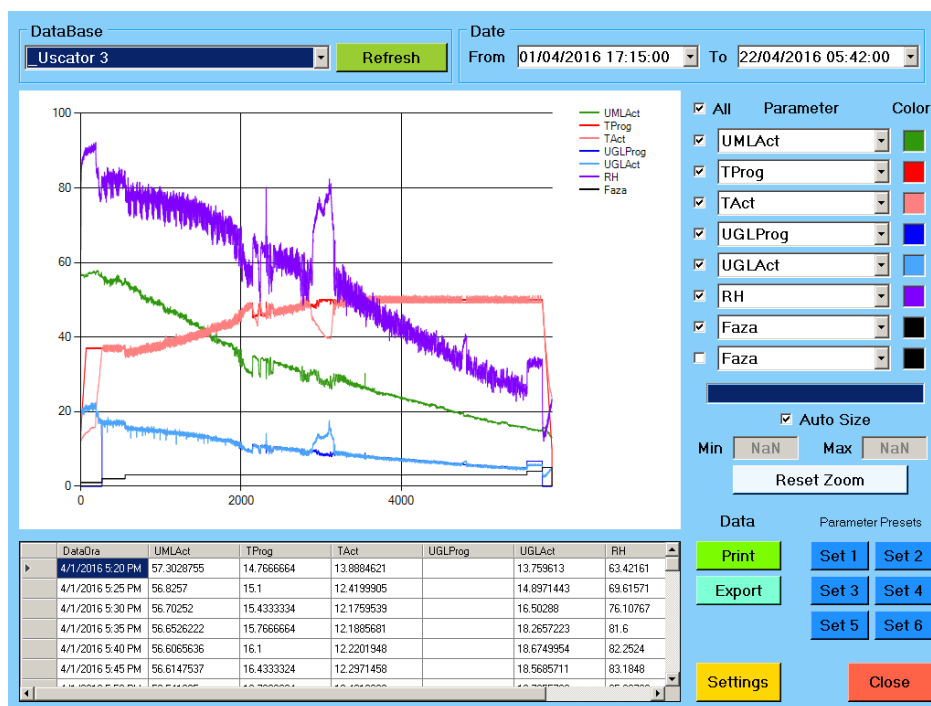


Figura 57 - Grafic proces de uscare

Prelucrarea datelor se face de catre un program specializat care reprezinta inteligenta producatorului si punerea in practica a experientei sale acumulate in scopul de a oferi clientilor cea mai buna alternativa posibila atat din punct de vedere al tehnicii uscarii cat si al interfatarii cu utilajul. Programul poate rula pe cele mai diverse dispozitive cum ar fi PLC-uri, calculatoare, tablete sau

microcontrolere. Indiferent de platforma folosită, programul trebuie să îndeplinească câteva funcții importante: controlul temperaturii și umidității, controlul timpului, oprirea procesului în anumite condiții. Fiecare producător poate implementa diverse funcții care ajută utilizatorul în activitatea de uscare cum ar fi posibilitatea implementării de rețete, statistici și grafice, controlul utilajului de la distanță sau prin intermediul dispozitivelor mobile, integrarea utilajelor în cadrul unui ERP sau al altui sistem.

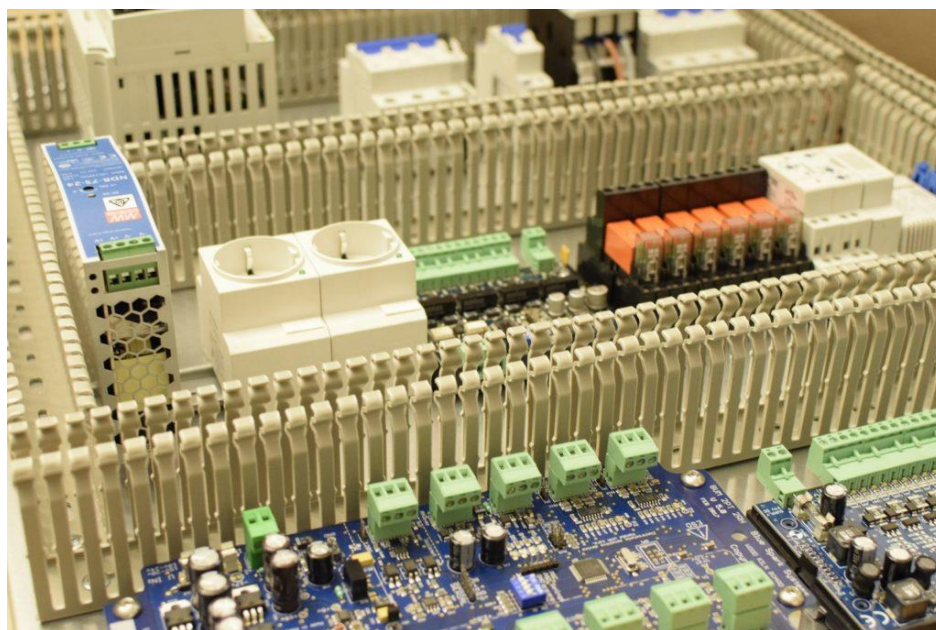


Figura 58 - Panou automatizare uscator

Elementele de execuție sunt cele prezentate anterior: ventilatoare, încălzire, clapete și umidificare. Controlul acestor elemente este efectuat de către programul care controlează automatizarea uscătorului în funcție de datele de intrare și logica procesului de uscare.

8.1. Conducerea automată a instalațiilor de uscare convectivă

8.1.1 Uscătorul convectiv obiect al automatizării

Uscarea produselor vegetale agricole este un proces care are ca **obiectiv principal** obținerea la finalul operațiunii a unui produs deshidratat care trebuie să se încadreze în criteriile calitative impuse acestui tip de produs alimentar, utilizând în mod optim resursele energetice, umane și financiare, în mod special energia termică. Din acest punct de vedere se pot defini alte patru obiective secundare.

A. Uscătorul este o instalație în care se reduce umiditatea produsului, operațiune prin care se reduc calitățile nutritive și gustative, fiind astfel în contradicție cu criteriile de calitate ale produselor alimentare: culoare, conținut de vitamine,

enzime, acizi organici etc. Rezultă că încadrarea în criteriile de calitate este greu de asigurat în condițiile în care economic se impune utilizarea la maxim a capacităților de producție cu costuri de producție minime. Ca urmare conducerea automată a uscătoarelor trebuie să rezolve optim aceste cerințe contradictorii. În figura 10.1 este prezentată schema bloc a unui uscător convectiv care este obiectul conducerii automate analizate în acest capitol.

B. Costurile de producție pentru uscarea produselor alimentare sunt puternic dependente și de energia termică utilizată, de tipul de combustibil, de sursă, de modul de conducere a procesului de uscare, știind că în prima perioadă de uscare, când se extrage apa liberă, puterea necesară este maximă. Ca urmare optimizarea energetică a procesului de uscare, prin obținerea de randamente de uscare reale cât mai mari reprezintă alt obiectiv al conducerii automate .

C. Criteriile de calitate impun ca umiditatea corpurilor din produsul final să fie cât mai uniformă, dar se știe că umiditatea inițială a produsului proaspăt, forma și suprafețele specifice, variază conform unei distribuții normale. Ca urmare se impune ca în conducerea automată a proceselor de uscare să se utilizeze o strategie care să reducă la minim efectul perturbațiilor asupra uniformității de uscare.

D. Cele trei obiective prezentate anterior conduc la concluzia necesității utilizării unor sisteme de conducere automată cu algoritmi de reglare evoluți, concepute și realizate special pentru instalațiile de uscare convectivă. Costul încă ridicat al traductoarelor, elementelor de execuție și a utilizării algoritmilor avansați de reglare care necesită sisteme numerice de conducere automată, limitează utilizarea acestora doar la nivel de instalații industriale cu capacități mijlocii și mari la care valoarea sistemului de conducere automată să nu depășească $\approx 15\%$ din investiție. Rezultă că un alt obiectiv constă în stabilirea pe criterii economice a nivelului de conducere automată, a structurii și a algorimilor utilizați pentru a se reduce cât mai mult influența subiectivității operatorului asupra performanțelor reale ale instalațiilor de uscare cu capacități mai mici de producție, având în vedere puternica tendință de descentralizare a prelucrării prin deshidratare a legumelor și fructelor, prin reducerea costurilor de transport a produselor proaspete și o adaptare cât mai flexibilă la variațiile sezoniere de producție specifice agriculturii.

În figura 10.1 este prezentată schema bloc generală a unui uscător convectiv.

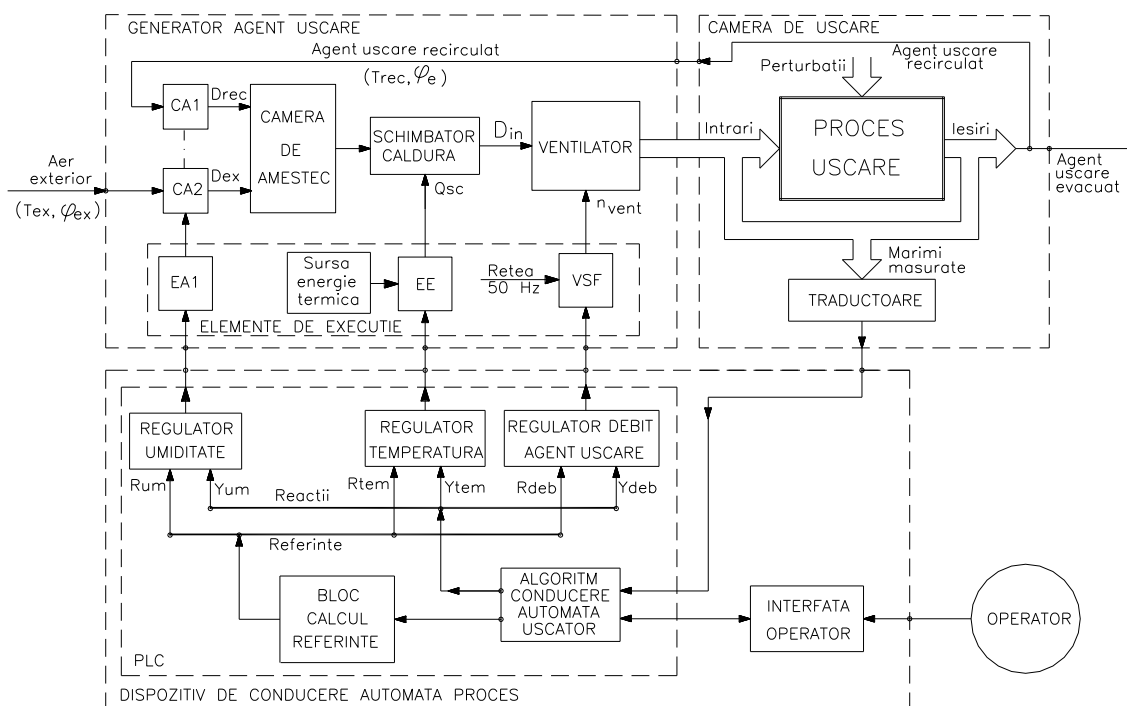


Figura 59. Schema bloc generală a unui uscător convectiv

Uscătorul convectiv este format din patru subsisteme:

- *camera de uscare* în care se derulează procesul de extragere a apei din materialul de uscat;
- *generatorul de agent de uscare* care pregătește aerul cald utilizat în procesul de uscare;
- *dispozitiv de conducere automată* care are rolul de a asigura funcționarea uscătorului conform unui program de uscare;
- *operatorul uman* care conduce operațiunile de încărcare, descărcare și funcționare a uscătorului.

8.1.2 Regimurile de funcționare ale uscătoarelor convective

Analiza proceselor de uscare pentru realizarea unei conduceri automate care să satisfacă obiective prezentate anterior se face pentru două regimuri de funcționare tipice instalațiilor de uscare convectivă cu capacități de producție mici și mijlocii: **șarjă** și **semicontinuu**.

Instalațiile de capacități medii tind să înlocuiască marile instalații care necesită investiții mari, sunt foarte greu de amortizat, necesită transportul unei mari cantități de produse proaspete pe distanțe mari, au programe de uscare rigide și pentru relativ puține sorturi, sunt puternic afectate de variațiile inerente ale producției agricole.

A. Uscare în regim de șarjă

Regimul de uscare de tip șarjă este tipic uscătoarelor cu capacitate mică și mijlocie. El se caracterizează prin:

- materialul de uscat este dispus uniform pe casete care sunt poziționate în coloane pe cărucioare fixe sau mobile;
- aerul cald se introduce cu o temperatură și o umiditate reglate automat, în funcție de programul de uscare selectat pentru tipul de material de uscat;
- se poate realiza controlul vitezei de uscare dU/dt și a temperaturii T_c la suprafața materialului de uscat prin cântărirea on-line a unui eșantion mediu sau prin calculul cantității de apă preluată de aer la trecerea prin camera de uscare.

B. Uscare în regim semicontinuu

Regimul de uscare de tip semicontinuu este tipic uscătoarelor cu capacitate mijlocie și mare. El se caracterizează prin:

- materialul de uscat este dispus uniform pe casete care sunt poziționate în coloane pe cărucioare ;
- circulația agentului de uscare și a cărucioarelor se face în contra-curent;
- periodic se scoate câte un cărucior cu materialul ajuns la umiditatea finală și la celălalt capăt al uscătorului se introduce un alt carucior încărcat cu material proaspăt;
- aerul cald se introduce cu o temperatură și o umiditate reglate automat, constante pe parcursul ciclului de funcționare al instalației și specifice tipului de material de deshidratat și a modului de pregătire;
- se măsoară temperatura și umiditatea la ieșire și se calculează cantitatea de apă extrasă din material care se deshidratează;
- se reglează raportul aer exterior/agent termic recirculat pentru controlul vitezei de uscare dU/dt și a temperaturii T_c la suprafața materialului de uscat.

8.1.3 Randamentul de uscare

Instalația de uscare convectivă, uscătorul, efectuează un proces de deshidratare și capacitatea sa de producție se măsoară cu debitul masic de apă extras din materialul de uscat, măsurat în $\text{kg}_{\text{apa}}/\text{s}$ sau $\text{kg}_{\text{apa}}/\text{h}$. Ca urmare din punct de vedere energetic procesul de uscare se caracterizează prin randamentul de uscare definit ca fiind randamentul corespunzător fazei de deshidratare în care se găsește produsul:

$$\eta_{\text{uscare}} = \frac{\text{Energia necesara pentru evaporarea apei}}{\text{Energia consumata in procesul de uscare}} \quad (10.1)$$

În cazul instalațiilor cu un nivel de automatizare mai ridicat se poate cântări

on-line masa unui eșantion de corpuri cu o poziție medie în fluxul de uscare și se calculează masa de apă extrasă și viteza de uscare. Ca urmare se poate calcula un randament de uscare instantaneu în funcție de debitul de apă $D_{apa}(t)$ extrasă din materialul de uscat și puterea termică $P_{tcon}(t)$ utilizată în procesul de uscare:

$$\eta_{uscare}(t) = \frac{D_{apa} (kg/s) \cdot r (kJ/kg)}{P_{termica\ consumata} (kWt)} \quad (10.2)$$

Deoarece randamentul de uscare instantaneu se poate calcula on-line el poate fi un criteriu de optimizare sau se utilizează în cadrul unui criteriu de optimizare mai complex.

Randamentul general al unei sarje (10.1) care este determinant pentru costul de producție se calculează după terminarea procesului de uscare și ca urmare nu poate fi utilizat în optimizarea procesului de uscare.

8.1.4 Procesul de uscare convectivă obiect al conducerii automate

Procesul de uscare convectivă se desfășoară într-o cameră de uscare a unui uscător convectiv. Schema bloc a procesului de uscare ca obiect al automatizării este prezentată în figura 10.2.

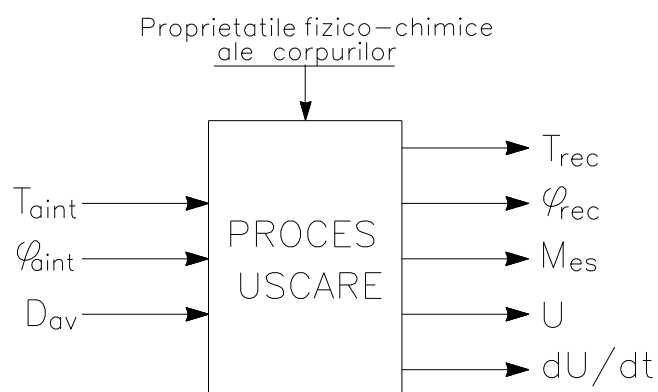


Figura 60. Procesul de uscare obiect al automatizării

Mărimile de ieșire măsurabile sunt:

- temperatura aerului la recirculare T_{rec} (°C);
- umiditatea relativă a aerului recirculat ϕ_{rec} (%);
- masa unui eșantion de corpuri M_{es} (kg).

Mărimile de ieșire calculabile sunt:

- umiditatea absolută U (kg_{apa}/kg_{cus}) a corpurilor din eșantionul cântătit în funcție de umiditatea inițial U_{ini} cunoscută a corpurilor;
- viteza de uscare dU/dt ($[kg_{apa}/kg_{cus}]/s$).

Perturbațiile sunt:

- proprietățile fizico-chimice ale corpurilor.

Mărimile de stare specifice procesului sunt:

- umiditatea absolută U ($\text{kg} \cdot \text{apa} / \text{kg} \cdot \text{cus}$) a corpurilor;
- temperatura T_c ($^{\circ}\text{C}$) a corpurilor;
- suprafața specifică S_{spec} ($\text{m}^2 / \text{kg} \cdot \text{cus}$) a corpurilor;
- viteza relativă aer - corp v_{aer} (m/s);
- indicele de calitate IC ($\text{kg} \cdot \text{sub} / \text{kg} \cdot \text{cus}$).

Mărimile de execuție sunt:

- temperatura aerului la intrare T_{aint} ($^{\circ}\text{C}$);
- umiditatea relativă a aerului la intrare ϕ_{aint} (%);
- debitul volumic de agent de uscare D_{av} (m^3/s).

În prima perioadă de uscare, când se extrage apa liberă procesele de transfer de masă și căldură sunt mai uniforme și se pot estima cu modele dinamice relativ simple. În perioada a II-a de uscare cu caracter difuziv neliniaritatea sistemului este foarte mare ceea ce face foarte dificilă obținerea unui model suficient de precis pentru a putea fi utilizat la conducerea predictivă.

Ca urmare pentru aceste tipuri de procese modelarea caracteristicii dinamice cu funcții de transfer nu reprezintă o modalitate operațională.

8.1.5 Măsurarea mărimilor care intervin în procesul de uscare

Pentru conducerea automată a proceselor de uscare convectivă a fructelor și legumelor uzual se pot măsura următoarele mărimi (figura 10.3):

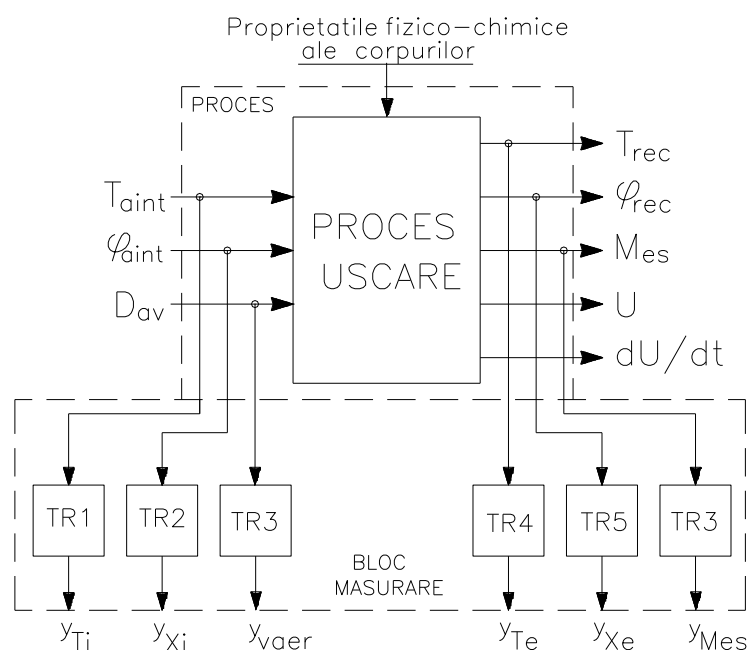


Figura 61. Schema bloc pentru interfața de măsurare

- temperatura aerului T_{aint} ($^{\circ}\text{C}$) la intrare în camera de uscare;
- umiditatea relativă ϕ_{aint} (%) a aerului la intrare în camera de uscare;
- debitul volumic de aer D_{av} (m^3/s) la intrare în camera de uscare;
- temperatura aerului T_{rec} ($^{\circ}\text{C}$) la ieșirea din camera de uscare ;
- umiditatea relativă ϕ_{rec} (%) a aerului la ieșirea din camera de uscare;
- masa M_{es} (kg) a unui eșantion de corpuri din camera de uscare.

Pentru modelul traductorului de temperatură se utilizează un model dinamic de ordinul 1 cu forma generală:

$$T_{TR} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_{TR} \cdot z(t - \tau_{TR}) \quad (10.3)$$

unde: T_{TR} – constanta de timp a traductorului (s);

k_{TR} – factorul de transfer al traductorului ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$);

τ_{TR} – timp mort (s).

Măsurarea on-line a mărimilor cu care se caracterizează calitatea produselor este foarte costisitoare sau imposibilă (încă!). Măsurătorile referitoare la calitatea materialului uscat se fac of-line după terminarea procesului și sunt utilizate pentru optimizarea programului de uscare specific pentru cazul analizat. Datele acumulate din seturi de experimente optimal organizate se prelucerează pentru a se obține legături funcționale suficient de precise pentru estimarea calității produsului în funcție de modul în care se desfășoară procesul de uscare. Aceste corelații utilizate în programele de tip expert, denumite și de asistare a deciziei, fac posibilă conducerea optimală a proceselor de uscare și în funcție de criteriile de calitate. Aceasta este în prezent obiectivul cercetărilor în domeniul conducerii proceselor de uscare, cu aplicații din ce în ce mai numeroase în prelucrarea produselor alimentare.

8.1.6 Mărimile de execuție ale proceselor de uscare convectivă

Pentru conducerea automată a proceselor de uscare convectivă se pot modifica următoarele mărimi de execuție cu care se poate influența evoluția proceselor:

- temperatura T_{aint} ($^{\circ}\text{C}$) de intrare în camera de uscare;
- umiditatea absolută X_{aint} ($\text{kg}_{\text{apa}}/\text{kg}_{\text{aus}}$) a aerului la intrarea în camera de uscare;
- viteza medie v_{aer} (m/s) a aerului în camera de uscare.

Aceste mărimi sunt mărimi de ieșire din generatorul de agent de uscare și reprezintă mărimi reglate pentru acest subsistem.

În prezent se constată că la uscarea în sarjă se utilizează două modalități de

uniformizare a umidității materialului uscat:

- schimbarea poziției relative a cărucioarelor în timpul unei sarje, astfel încât fiecare cărucior să treacă prin toate zonele termice ale camerei de uscare.
- schimbarea sensului de circulație a aerului, care se practică uzual la uscarea lemnului, este utilizată numai la uscătoare cu capacități de producție medii, integral automatizate, deoarece implică complicații constructive care conduc la creșterea investiției inițiale și a costurilor de producție.

Numărul relativ mic al mărimilor de execuție utilizabile pentru conducerea automată a procesului de uscare implică necesitatea utilizării unor algoritmi de reglare neconvenționali, complexi, cu care se pot obține performanțe tehnologice, energetice și economice ridicate.

8.1.7 Modalități clasice de conducere automată a regimului de uscare

În cazul cel mai general se utilizează algoritmi de reglare clasici de tip PID, tripozițional și bipozițional, în funcție de tipul generatorului de energie termică la care poate variația puteri de încălzire este continuă.

Reglarea automată a temperaturii T_{aint} a aerului la intrarea în camera de uscare se face cu un algoritm PID dacă se poate varia continuu puterea termică transmisă agentului de uscare. Dacă variația puterii termice este discretă, cazul tipic al arzătoarelor de combustibil lichid sau gazos, se utilizează un algoritm bipozițional simplu sau dublu, care însă produce oscilații periodice relativ mari ale parametrilor agentului de uscare la intrarea în camera de ardere contribuind la creșterea gradului de neliniaritate a procesului de uscare.

Reglarea automată a umidității absolute a aerului X_{aint} la intrarea în camera de uscare se face în camera de amestec în care se modifică raportul debitelor de agent de uscare recirculat D_{arec} cu X_{arec} și de aer exterior D_{aex} cu $X_{aex} < X_{arec}$ care se amestecă pentru a se obține un debit $D_{am} = D_{av}$ cu $X_{am} \in (X_{aex}, X_{arec})$. Deoarece perturbațiile acționează lent pentru reglare se uzual se utilizează un algoritm tripozițional; se pot utiliza și algoritmi PID care însă solicită mult mai mult servomotorul de acționare a clapetelor de amestec reducându-i durabilitatea.

Reglarea automată a vitezei v_{aer} a agentului de uscare în camera de uscare se face prin variația debitului D_{av} al ventilatorului din instalația de prelucrare a agentului de uscare. Se utilizează algoritmi de reglare PID cu care se comandă variația turației ventilatorului.

Deoarece circulația aerului în uscător se face cu viteze relativ mici apar timpi morți de transport care pot contriui substanțial la scăderea performanțelor de

reglare în cazul utilizării algoritmilor clasici, fără predicție.

8.1.8 Reglarea automată a debitului de agent de uscare

Reglarea automată a debitului volumic de aer D_{av} se face prin intermediul vitezei aerului v_{aerm} măsurată la intrarea în camera de uscare, deci se va regla automat valoarea vitezei cu o referință calculată astfel:

$$r_{vaerm} = r_{vaeru} \frac{S_{camusc}}{S_{masv}} \quad (m/s) \quad (10.4)$$

unde: r_{vaerm} – referință viteză aer la intrare în camera de uscare (m/s);

r_{vaeru} – referință viteză aer în interiorul camerei de uscare (m/s);

S_{camusc} – secțiunea de trecere a aerului prin camera de uscare (m²)

S_{masv} – secțiunea de măsurare a vitezei aerului (m²).

Schema bloc a circuitului de reglare automată a vitezei aerului este prezentată în figura 10.4.

Din punct de vedere dinamic toate întârzierile de tip timp mort ale subsistemelor generatorului se adună și se modelează în elementul - canale de aer - care este plasat la ieșirea din schema bloc a generatorului.

Traductorul pentru măsurarea vitezei aerului se modelează cu modelul clasic (10.3) și după măsurare se face conversia în unități ingineresti, astfel încât mărimea de reacție y_{vaerm} are unitatea de măsură (m/s), ceea ce face posibilă utilizarea unei referințe r_{vaerm} în (m/s).

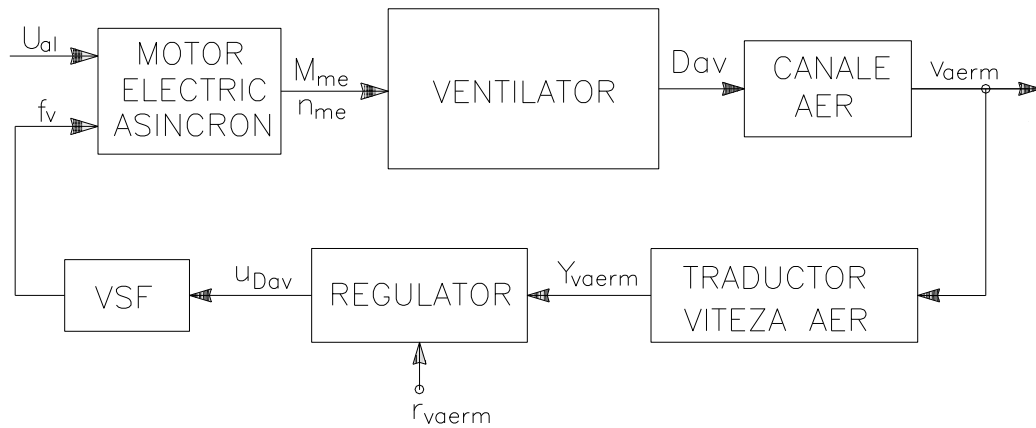


Figura 62. Schema bloc reglare automată viteză aer

Regulatorul pentru viteza aerului este de tip PI, numeric, la care constanta de timp T_i se setează la o valoare mare și factorul de proporționalitate K_R la o valoare mică pentru a obține o pantă mică de modificare a turației ventilatorului. Mărimea de comandă u_{Dav} se aplică unui variator static de frecvență VSF care generează un

curent alternativ cu frecvență variabilă în domeniul 20 – 60 Hz cu care se alimentează motorul asincron al ventilatorului.

Pentru economie de energie electrică și o fiabilitate sporită este recomandat să se utilizeze un motor asincron construit special pentru funcționare la frecvențe variabile.

În figura 10.5 este prezent un grafic al funcționării circuitului de reglare automată a vitezei aerului la o variație de tip rampă pozitivă a referinței.

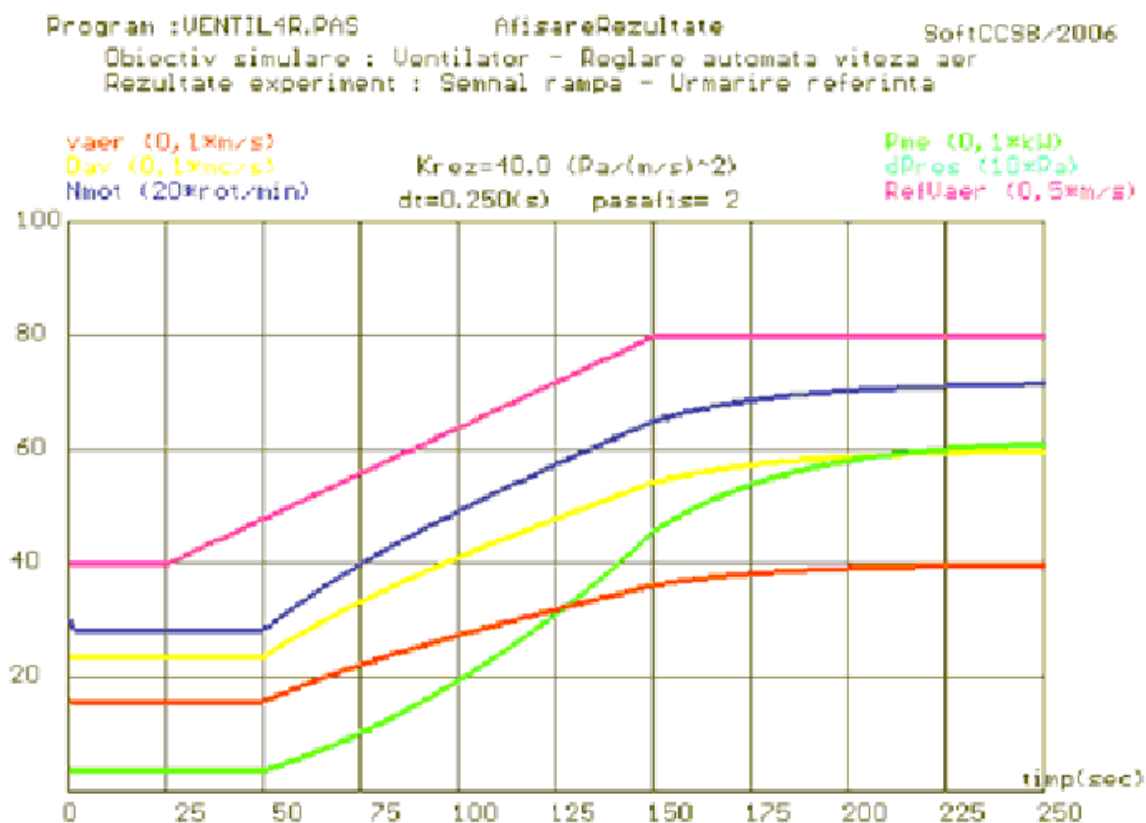


Figura 63. Regim funcționare cu referință rampă

8.1.9 Reglarea automată a umidității absolute X_{am}

În figura 10.6 este prezentată schema bloc a circuitului de reglare automată a umidității absolute X_{am} la ieșirea din camera de amestec.

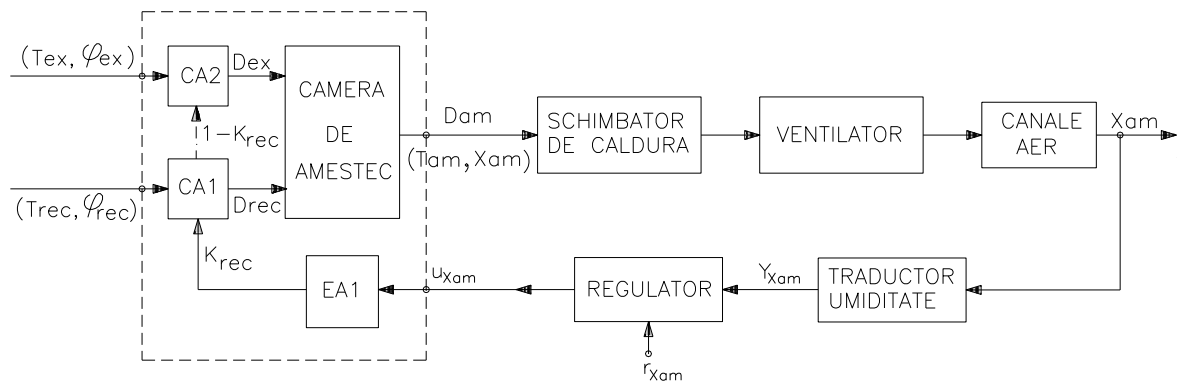


Figura 64. Schema bloc a reglării automate a umidității absolute

Traductorul de umiditate măsoară umiditatea relativă a aerului la intrarea în camera de uscare ϕ_{aint} (%), convertind-o în mărimea de ieșire y_{ua1} care poate varia în domeniul 0...10 V. Pentru modelul traductorului se utilizează varianta clasică de forma generală (10.3).

Pentru a putea fi ușor de comparat cu referința dată în ($\text{kg} \cdot \text{apa} / \text{kg} \cdot \text{au}$) se face conversia în mărimi ingineresti:

{-----}

$F_{iaint} = y_{ua1} / K_{tru1}$ # umiditate de intrare (%)

$T_{aer} = T_{aint}$

$X_{satur}(T_{aer})$

$X_{aint} = F_{iaint} * X_{sat}$ # umiditate absoluta aer la intrare ($\text{kg} \cdot \text{apa} / \text{kg} \cdot \text{au}$)

{-----}

Reglarea automată a umidității amestecului se face având ca mărime de referință umiditatea absolută a aerului care corespunde valorii de referință a temperaturii de saturație T_{satr} a agentului de uscare la intrarea în camera de uscare care trebuie să fie convertită în umiditate absolută:

{-----}

$T_{aer} = T_{satr}$

$X_{satur}(T_{aer})$

$X_{amr} = X_{sat}$; # valoare referinta absoluta

{-----}

Regulatorul utilizează un algoritm de tip trip pozițional care realizează performanțe bune de reglare cu un minim de acționare asupra sistemului de clapete, ceea ce le asigură o foarte bună durabilitate. Mărimile caracteristice sunt histeresisul Δ și pragul de insensibilitate δ , care se dau ca valori relative la referința X_{amr} .

În figura 65 este prezentat graficul funcționării camerei de amestec cu reglare

automată pentru $X_{amr} = \text{constant}$ și perturbațiile X_{arec} și X_{aex} variabile.

Modelul numeric al algoritmul de reglare tripozițional este de forma:

$$u_{Xam}([i]) = \begin{cases} -1 & \text{pentru } \varepsilon[i] \geq E_2 \\ 0 & \text{pentru } |\varepsilon[i]| < E_1 \\ 1 & \text{pentru } \varepsilon[i] \leq -E_2 \\ u[i-1] & \text{pentru } E_1 < |\varepsilon[i]| < E_2 \end{cases} \quad (10.5)$$

unde : $\Delta = E_2 - E_1 = 0,01X_{amr} \text{ (1 \%)};$

$\delta = 0,5 \cdot (E_1 + E_2) = 0,01X_{amr} \text{ (1 \%)};$

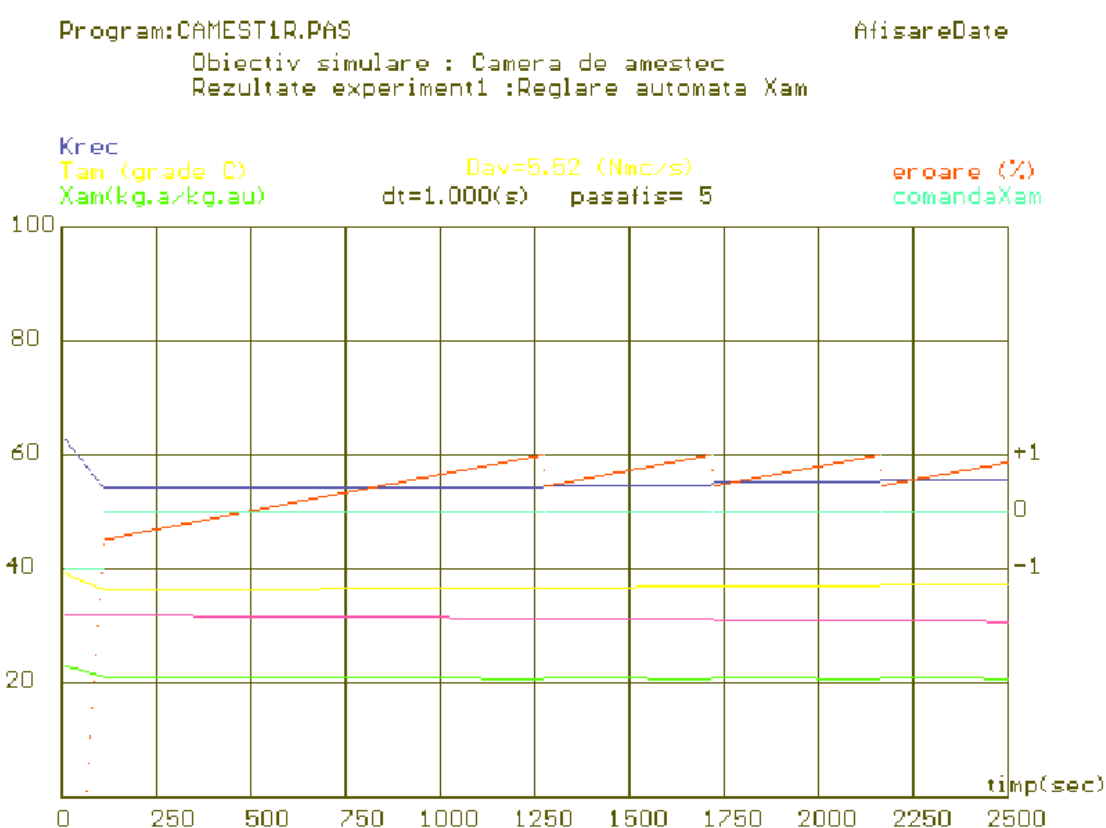


Figura 65. Grafic regim reglare automată X_{am}

8.1.10 Reglarea automată a temperaturii aerului

În figura 10.8 este prezentată schema bloc a circuitului de reglare automată a temperaturii aerului T_{aint} la intrarea în camera de uscare.

Traductorul de temperatură măsoară temperatura aerului T_{aint} (°C) la intrarea în camera de uscare și o convertește în mărimea de ieșire y_{Taint} care variază în

domeniul 0...10 V. Pentru a putea fi ușor de comparat semnalul de ieșire se convertește în mărimi ingineresti.

Reglarea automată a temperaturii se face cu un regulator care elaborează un semnal de comandă u_{sc} care este aplicat unui element de execuție EE cu care se modifică cantitatea de căldură Q_{sc} preluată de la sursa de energie termică, prin variația puterii termice transferate prin SC. Ca urmare atât algoritmul de reglare cât și EE depind de caracteristicile sursei de energie termică.

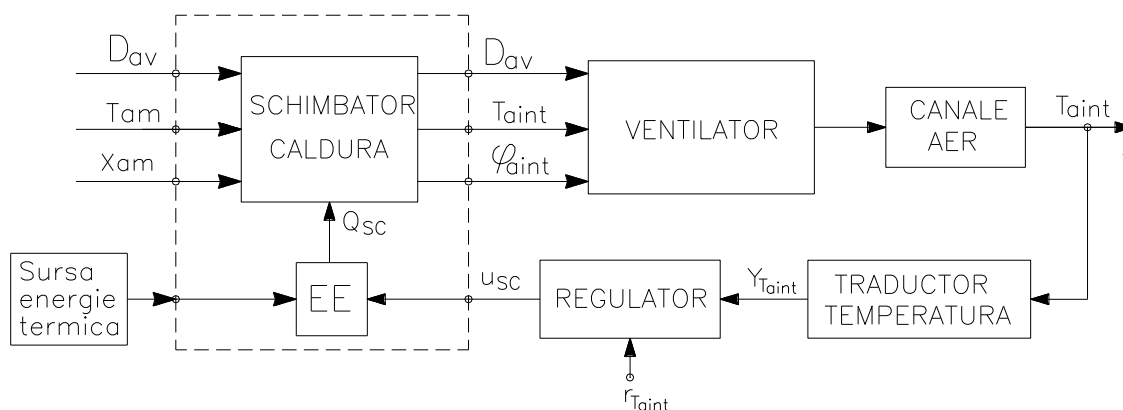


Figura 66. Schema bloc a reglării automate a temperaturii aerului

Agentul termic poate fi:

- gaze calde – gaze de ardere sau abur nesaturat;
- lichide calde: apă caldă, apă fierbinte, ulei cald.

În cazul utilizării ca sursă termică a gazelor de ardere, acestea sunt produse prin arderea unui combustibil gazos, lichid sau solid cu un dispozitiv numit arzător.

Reglarea debitului de combustibil se poate face în două moduri:

- discret de tip:
 - pornit – oprit
 - în două trepte
 - în trei trepte
- continuu între două limite.

Arzătoarele pentru gaz natural și GPL sau lichide pentru puteri mici, până la 100 kW, sunt de tip discret; peste 100 kW sunt utilizabile și arzătoare cu variația continuă a puterii termice.

În cazul utilizării unui combustibil solid, în prezent biomasa peletizată sau tocată, variația puterii termice se poate face continuu prin variația debitului de combustibil introdus în camera de ardere.

O alta variantă încă puțin utilizată constă în gazeificarea biomasei și arderea gazului combustibil obținut pentru producerea de energie termică cu bilanț nul sau negativ de CO₂.

8.1.11 Reglarea temperaturii pentru o variație continuă a puterii termice

Atunci când se poate varia continuu debitul de combustibil consumat, deci puterea termică transferată la SC, se pot utiliza algoritmi de conducere automată de tipul:

- tripozițional - pentru procese cu inerție termică mare, deci cu o constantă principală T_f a procesului mare;
- PI - pentru uscătoare cu inerție termică mică;
- a sau b – în funcție de tipul de element de execuție specific sursei de căldură utilizate.
- special elaborat pentru surse de căldură neconvenționale, uzual pentru surse regenerabile de energie: solară, biomasă, geotermală.

8.1.12 Reglare automată a vitezei de uscare

Pentru a crește performanțele energetice, calitative și economice se pot utiliza diferiți algoritmi de optimizare care însă necesită utilizarea unei proceduri de identificare on-line a procesului de uscare.

Deoarece se fac multe șarje de uscare pentru același tip de produs se poate stabili of-line un program de uscare optim care are o valoare optimă pentru viteza de uscare $dU(t)/dt$ în funcție de valoarea umidității absolute $U(t)$ a corpurilor aflate în procesul de uscare convectivă.

Măsurarea mărimilor implicate în conducerea procesului de uscare se face eșantionat cu o perioadă Δt_{cd} și se măsoară valoarea $M_{es}[k]$ a masei unui eșantion de corpuri. Cu această valoare se poate calcula (estima) valoarea umidității absolute $U[k]$ funcție de umiditatea absolută inițială U_{ini} a eșantionului măsurat.

Inițial înainte de pornirea procesului de uscare se face o măsurare a masei inițiale $M_{es}[1] = M_{esini}$ (kg) a eșantionului. În funcție de tipul de corpuri de uscat se cunoaște valoarea medie a umidității relative ϕ_{cini} (%) cu care se calculează masa uscată M_{esusc} (kg) a eșantionului.

{-----}

```
def MasaUscataEsantion(): # calculare masa uscata esantion
```

```
    Uini = Ficrelini / (100- Ficrelini) # kg .apa/kg.cus ; umid. abs. initiala
    esantion
```

```

Mesusc = Mesini / (Uini+1)      # kg.cus ; masa uscata esantion
Ues = Uini                     # initializare umiditate initiala esantion
# end MasaUscataEsantion
{-----}

```

Valoarea Mesusc este utilizată pentru calculul on-line a umidității absolute Ues și a vitezei de uscare Vusc în timpul procesului de uscare.

```

{-----}
def CalculUmAbs(): # calculare umiditate absoluta esantion
    dMes = Mesmem - Mes
    Ues = Uesmem - dMes/Mesusc # kg.apa/kg.cus ; umid. absoluta esantion
    Vusc = (dMes/dt)/Mesusc    # kg.apa/kg.cus/s ; viteza de uscare
# end CalculUmAbs
{-----}

```

Programul de uscare este de forma generală: $Vusc = F(Ues)$, unde F este o funcție continuă sau este definită pe domenii ale Ues între U_f și U_{ini} .

Algoritmul pentru cel mai simplu program de uscare este de forma:

```

{-----}
def ProgramUscare1(): # program uscare de tip 1
    if (Ues >= Ucr):   # umiditate mai mare ca cea critica
        Vuscresf = Vusc1 # kg.apa/kg.cus/s ; pentru perioada I cu apa libera
    if (Ues[k] < Ucr): # variatie liniara
        Vuscresf = Vusc1*(Ues[k]-Uf)/(Ucr-Uf) # pentru perioada II difuziva
# end ProgramUscare1
{-----}

```

Modificarea referințelor necesară pentru obținerea unei viteze de uscare conformă cu programul se face pentru prima perioada de uscare prin modificarea referinței r_{temp} a temperaturii de intrare a aerului cald pentru a se varia fluxul termic spre corpurile la uscat. Se menține referința pentru umiditatea absolută de intrare pentru a menține temperatura corpurilor la valoarea optimă.

În perioada a doua se reduce atât r_{temp} cât și r_{Xa} pentru a nu crește temperatura corpurilor peste valoarea limită specifică materialului de uscat.

Capitolul 9 - Tehnici de asistență la uscarea solară

Diferite tehnici au fost utilizate împreună cu procesul convențional de uscare solară pentru îmbunătățirea ratelor de uscare, reducerea asociată a timpului de uscare și îmbunătățirea generală a calității și acceptabilității produsului. Tehnicile hibride se concentrează pe accelerarea ratelor de uscare și reducerea cerințelor de timp de uscare. Din punct de vedere al proiectării, combinarea colectoarelor solare și a uscătoarelor cu pompă de căldură poate ajuta la îmbunătățirea utilizării energiei solare și la eficiența performanței uscătorului. Un sistem tipic de pompă de căldură asistată de energie solară (SAHP) funcționează pe ciclul de compresie a vaporilor și poate fi integrat pentru un coeficient de performanță (COP) mai mare (Yahya et al., 2016). Pe baza componentelor de proiectare, sistemele SAHP pot fi clasificate ca SAHP convenționale și SAHP cu expansiune directă (DX-SAHP). Primul este un design mai simplu, care constă din două componente separate, una pentru colectarea energiei solare și cealaltă pentru vaporizarea agentului frigorific. În cazul DX-SAHP, se utilizează o singură unitate pentru colectarea energiei, precum și vaporizarea agentului frigorific. Astfel, oferă o eficiență mai mare la costuri reduse ale colectorului.

În ultima vreme, alte tehnici de procesare a alimentelor sunt, de asemenea, combinate cu uscarea solară. Unele exemple includ uscarea convectivă cu microunde, uscarea asistată IR, uscarea integrată în pat fluidizat și uscarea solară asistată de vid. Într-un studiu recent, efectul vidului asupra îmbunătățirii performanței unui uscător solar a fost examinat pentru uscarea frunzelor de ceai negru. Studiul s-a concentrat pe optimizarea parametrilor de proces pentru a obține păstrarea maximă a atributelor de calitate ale culorii și aromei cu cerințe minime de procesare, timp și energie (Pou și Tripathy, 2020). Un rezumat al diverselor aplicații ale unor astfel de tehnici asistate de energie solară este prezentat în [Tabelul 7](#). Această abordare poate ajuta la îmbunătățirea păstrării atributelor de calitate, în special pentru materialele sensibile la căldură, cum ar fi condimentele, ierburile și culturile de plantații. În afară de păstrarea calității și a componentelor nutriționale, abordările de uscare asistate de energie solară utilizează relativ mai puțină energie și, de asemenea, reduc dependența de combustibili fosili. Cu toate acestea, cerințele de cercetare sunt uriașe, în special pentru optimizarea condițiilor de uscare.

Tabelul 7. Studii recente privind tehnologiile de uscare asistată de energie solară pentru alimente.

Tehnica asistată de energie solară	Studiu	Rezultatele	Referințe
Sistem pompă caldura asistată de energie solară	de Eficiența de performanței uscătorului solar și a uscătorului SAHP pentru uscarea așchiilor de manioc	Eficiența termică medie a uscătoarelor solare și SAHP a fost de 25,6 și, respectiv, 30,9%. Aplicarea sistemelor de pompe de caldura cu uscătoare solare ar putea îmbunătăți ratele de uscare și valorile medii COP	Yahya et al. (2016)
Uscător cu pat fluidizat asistat de energie solară	Analiza energetică și exergică a straturilor fluidizate sisteme combinate SAHP pentru uscarea frunzelor de mentă	Eficiența energetică și exergică a sistemului de uscare a fost de 50% și, respectiv, 26%, cu o valoare COP de 5	Ceylan și Gürel (2016)
Uscător integrat cu pat fluidizat SAHP	Uscătorul cu pat fluidizat SAHP a fost integrat cu un cuptor de biomasă pentru uscarea orezului	Reducerea eficientă a umidității de la 32,85% (d.b.) la 16,29% (d.b.) în mai puțin de 30 de minute, cu un debit masic de 0,1037 kg/s, temperatură medie de uscare de 81 °C și umiditate relativă de 8,1%	Yahya și colab. (2018)
Uscare solară combinată IR	Cinetica de uscare a feliilor de cartofi folosind uscător IR intermitent asistat de energie solară	Aplicarea IR cu energie solară a dus la o reducere semnificativă a timpului de uscare (până la 31-52%). În mod similar, consumul de energie a fost redus la 40-70%	Ziaforoughi și Esfahani (2016)

Tehnica asistată de energie solară	Studiu	Rezultatele	Referințe
		prin utilizarea sistemelor fotovoltaice combinate	
Uscător de alimente convectiv microunde intermitent derivat din energie solară	Performanță pentru uscarea feliilor de cartofi	Impact pozitiv atât asupra atributelor fizice, cât și asupra atributelor texturale ale produsului. Uscarea cu microunde asistată de energie solară a utilizat eficient energia fără a compromite calitatea alimentelor uscate	Joardder et al. (2019)
Uscător de pat asistat de energie solară	Eficacitatea uscătorului de pat asistat de energie solară asupra atributelor de calitate ale mazărei	Considerentele de proiectare au avut un impact semnificativ asupra intensității radiației solare (585-950 W/m ²). Uscătoarele cu pat asistat de energie solară ar putea oferi o difuzivitate mai mare ($3,27 \times 10^{-10}$ m ² /s) decât uscarea la soare deschis ($0,64 \times 10^{-10}$ m ² /s). Mai mult, uscătoarele cu pat asistate de energie solară au dus la mazăre uscată cu o capacitate mai mare de rehidratare, contracție mai mică și porozitate mai mare decât mazărea uscată la soare deschisă.	Sahin et al. (2013)
Uscător solar fotovoltaic hibrid asistat cu pompă de căldură	Efectul debitului de aer, al temperaturii de uscare și al modurilor de uscare (cu și fără pompă de căldură)	Odată cu creșterea vitezei aerului, transferabilitatea căldurii panoului fotovoltaic absorbant solar s-a îmbunătățit, sporind astfel eficiența termică a uscătorului. Uscătoarele solare hibride sunt mai potrivite și mai	Mortezapour et al. (2012)

Tehnica asistată de energie solară	Studiu	Rezultatele	Referințe
	pentru uscarea șofranului	eficiente în uscarea produselor sensibile termic, cum ar fi șofranul.	
Uscător solar cu dublă trecere asistat de infraroșu	Evaluarea performanței uscătorului solar și solar-infraroșu de mentă și mere folosind metodologia energie-exergie	Eficiența termică a colectorului s-a dovedit a fi de 83,56%. Eficiența energetică a variat între 1,15% și 8,59% pentru DPSAIRD, 2,20% și 26,46% pentru DPSAD. Lampa IR a crescut semnificativ consumul de energie; Cu toate acestea, în cazurile în care colectorul era insuficient, acesta susținea colectorul și proteja produsul împotriva deteriorării.	Sevik et al. (2019)

Capitolul 10 - Modelarea proceselor de uscare solară

Modelarea este un instrument puternic și, în ultimele zile, a găsit numeroase aplicații în domeniul larg al agriculturii ([Moses et al., 2015](#), [Moses et al., 2015b](#)). Deoarece majoritatea modelelor de uscătoare nu sunt neapărat optime în ceea ce privește consumul de energie, calitatea produsului final, siguranța operațională și controlul procesului, parametrii lor de proces pot fi cel mai bine configurați pe baza modelării și a abordărilor numerice. Cei mai importanți factori care trebuie luați în considerare în timpul modelării uscătoarelor solare și evaluarea performanței sistemului includ proprietățile termofizice (densitate, capacitate termică specifică și conductivitate termică) și proprietățile de transport (coeficientul de transfer de căldură și masă, coeficientul de difuzie). În general, modelarea a fost utilizată pentru calculul proceselor, proiectarea echipamentelor și controlul general al proceselor de uscare solară ([Alam et al., 2018](#)). Diferitele abordări pentru modelarea unor astfel de procese de uscare pot fi grupate astfel:

- Modele care prezic cinetica transferului de masă pe baza relațiilor empirice;

- Modelare termică pentru a selecta modele adecvate și pentru a optimiza condițiile de proces ale unui uscător solar;
- Calcule ingineresti bazate pe legi fizice pentru a facilita selecția proiectului;
- Modele analitice, inclusiv cele care iau în considerare variațiile orare ale temperaturii produsului ca o funcție care afectează ratele de uscare;
- Simulare numerică și abordări bazate pe dinamica fluidelor computaționale (CFD);
- Modele care lucrează pe legi fundamentale luând în considerare relațiile dintre diferite fenomene.

Modelarea cineticii de uscare a alimentelor poate ajuta la o mai bună înțelegere a procesului de uscare solară. Cinetica de uscare variază pentru fiecare produs alimentar. În general, cinetica de uscare poate fi evaluată pe baza legii de răcire a lui Newton, a legii de difuzie a lui Fick și a modelelor empirice. Modelele cinetice de uscare care sunt derivate din legea răcirii lui Newton includ modelul Lewis, modelul lui Newton, modelul Page și modelul Page modificat. Alte modele, cum ar fi modelul Henderson și Pabis, modelul Henderson și Pabis modificat, modelele Midilli și modelele Midilli modificate, modelul logaritmic, modelul cu doi termeni, modelul cu trei termeni, modelul exponențial cu doi termeni, modelul Verma și modelul de difuzie aproximativă se bazează pe a doua lege a difuziei lui Fick. Pe de altă parte, modelul Wang și Singh, modelul Diamante, modelul Weibull, modelul Thompson, modelul Da Silva și modelul Peleg sunt modele empirice utilizate pentru determinarea comportamentului de uscare a materialelor alimentare ([Prakash și Kumar, 2017](#)).

Pentru a depăși limitările modelelor existente, au fost făcute modificări pentru o analiză îmbunătățită a performanței și eficienței uscătoarelor. Printre acestea, modelele matematice adoptate pe scară largă sunt difuzia lui Fick și ecuațiile Page modificate. [Akamphon et al. \(2018\)](#) au folosit o abordare de modelare matematică pentru evaluarea performanței unui uscător solar prin integrarea domeniului fizic (dinamica fluidelor, transferul de căldură și transferul de masă). Practic, majoritatea produselor alimentare suferă contracție în timpul uscării și acest lucru explică faptul că apar abateri în proces și modelele de bază pot să nu explice cu exactitate datele experimentale. În general, o analiză detaliată a sistemului prin modelare poate servi ca un instrument eficient în prezicerea performanței și eficienței unui uscător solar.

Analiza fluxului de fluid și a performanței sistemului asociate poate fi prezisă folosind CFD. În această abordare, proprietățile termodinamice ale sistemului sunt luate în considerare în software-ul de calculator prin definirea condițiilor inițiale și la limită necesare pentru a simula funcționarea în timp real. Sunt disponibile diverse pachete software avansate pentru rezolvarea unor astfel de procese complexe de uscare, cel mai adesea folosind analize cu elemente finite și volume finite. Din datele simulate, rezultatele pot fi prognozate înainte de implementarea sistemului propriu-zis. [Dhalsamant et al. \(2018\)](#) au raportat un studiu privind simularea numerică și validarea experimentală a transferului de căldură într-un uscător solar în mod mixt pentru cartofi supuși contracției. În mod similar, [Jain et al. \(2019\)](#) au raportat un studiu privind simularea CFD și analiza energetică a unui uscător solar de tip direct casnic.

Temperatura din interiorul uscătorului poate fi evaluată în mod convenabil. Acești cercetători au raportat, de asemenea, că timpul de recuperare a amortizorului a fost de 7,57 ani, iar creditul de carbon a reprezentat 2055 INR. Mai mult, s-a constatat că coeficientul unei determinări în condiții fără sarcină a fost de 0,98, arătând un acord bun cu valorile experimentale. În general, un model dezvoltat pentru a explica procesul de uscare ar trebui să ia în considerare proprietățile materialelor utilizate, fenomenele de transport de bază (transfer de căldură și masă) și implicația diferitelor componente individuale de proiectare asupra performanței generale a uscătorului. Modelele CFD pot gestiona în mod convenabil și efectele variațiilor geografice. Într-un alt studiu, [Kuan et al. \(2019\)](#) au raportat o analiză numerică de simulare a evaluării performanței unui uscător solar, a unui uscător cu pompă de căldură și a unui uscător cu pompă de căldură asistată de energie solară. Dintre aceste uscătoare, acesta din urmă s-a dovedit a fi mai eficient din punct de vedere energetic decât celelalte. Rezultatele au arătat că rata specifică de extracție a umidității și coeficientul de performanță al uscătorului solar asistat de pompă de căldură au fost de aproximativ 0,6 kg/kWh și, respectiv, 2,72. Acest studiu a evidențiat potențialele beneficii economice ale integrării uscătoarelor solare cu uscătoare cu pompă de căldură pentru performanțe de uscare îmbunătățite și consum redus de energie.

Modelarea termică a uscătoarelor solare implică echilibrarea fluxului de energie între sisteme, urmând o serie de ipoteze de echilibru energetic: suprafața de uscare trebuie să se potrivească cu capacitatea absorbantului, fluxul de aer uniform în camera de uscare; pierderea de energie termică de la colector la aerul înconjurător, iar pereții și tăvile uscătorului sunt neglijabile ([Prakash et al., 2016](#)). Studiile de modelare termică pot ajuta la determinarea eficienței energetice a

sistemului de uscător. Un alt tip avansat de modelare folosind concepte TIC emergente este ANFIS (sistem de interferență fuzzy bazat pe rețea adaptivă). Această abordare folosește conceptul de rezolvare a regulilor fuzzy, luând în considerare echivalențele funcționale. Se bazează pe abordarea rețelei neuronale și constă în algoritmi computaționali complecși pentru rezolvarea procesului de transfer de energie folosind un model Takagi-Sugeno. Conceptul de modelare fuzzy implică importul și exportul modelelor fuzzy care controlează datele de intrare și ieșire ale sistemului luat în considerare. Acestea au fost folosite pentru a prezice cu precizie performanța uscătoarelor solare de seră. [Al-Mahasneh et al. \(2013\)](#) au modelat comportamentul de uscare la soare al grâului verde și au arătat că modelarea fuzzy poate servi ca un instrument excelent pentru a prezice comportamentul de uscare al grâului (difuzivitate efectivă de $1,73 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$).

Modelarea ANN (rețea neuronală artificială) implică o analiză a sistemului care ajută la evaluarea celor mai bune condiții de proces pentru obținerea de beneficii economice. Aplicarea RNA a fost raportată pentru prezicerea temperaturii și a conținutului de umiditate al produselor alimentare în timpul uscării solare. De exemplu, diverși factori critici, cum ar fi intensitatea solară și temperatura aerului, pot fi setați ca parametri de intrare în timpul procesului de modelare; rezultatele implică simularea și predicția temperaturii în timpul uscării solare, iar acestea pot fi susținute în continuare cu modele statistice și de difuzie ([Tripathy și Kumar, 2009](#)). Sistemele bazate pe inteligența artificială (AI) câștigă importanță în mai multe aplicații de procesare a alimentelor, iar utilizarea lor în uscătoarele solare este, de asemenea, explorată, adesea explicată ca "sisteme experte". Acestea pot oferi supraveghere și control sporit asupra procesului.

Capitolul 11 – Alegerea tipului de uscare

Calitatea este un aspect important, iar atributele vizuale dau prima impresie despre calitatea majorității produselor alimentare ([Vithu și Moses, 2016](#)). Câteva exemple de modificări ale calității produsului în timpul uscării solare includ rumenirea, migrarea nutrienților, întărirea carcabei și pierderea componentelor volatile. Prin urmare, este necesară o alegere prudentă a abordărilor de uscare pentru a asigura produse de bună calitate ([Raghavi et al., 2018](#)). Expunerea la lumina directă a soarelui este necesară pentru produse precum curmalele, deoarece favorizează dezvoltarea culorii caracteristice. În mod similar, uscarea la soare a cafelei Arabica favorizează dezvoltarea aromei aromatice în timpul etapei ulterioare de prăjire. Mai mult, culturi precum cafeaua, tutunul, ceaiul, boabele de cacao, orezul și nucile necesită în esență timpi de uscare mai lungi la temperaturi

mai scăzute. În unele cazuri, boabele de cafea uscate într-un uscător solar cu colectoare solare cu transpirație neagră sunt cunoscute pentru a avea rate de uscare crescute, în afară de faptul că au ca rezultat produse uscate cu o calitate acceptabilă. Atât uscătoarele solare de tip direct, cât și cele indirecte sunt potrivite pentru uscarea majorității condimentelor. Pentru uscarea produselor sensibile la căldură, au fost utilizate uscătoare solare cu sisteme de seră, deoarece pot păstra calitatea. În cazul uscării cerealelor alimentare, cum ar fi orezul, se folosesc uscătoare solare pasive în mod mixt, deoarece oferă un grad ridicat de alb decât orezul uscat la soare.

Un studiu efectuat privind analiza calității turmericului negru uscat într-un uscător solar în mod mixt a raportat o variație a atributelor calitative din cauza distrugerii termice a pigmentilor, oxidării și rumenirii enzimatic sau neenzimatic care au avut loc în timpul uscării (Lakshmi et al., 2018). Un exemplu de modificări de textură apărute în timpul uscării alimentelor folosind diferite metode de uscare este prezentat în Fig. 67.



Figura 67. Modificări de textură apărute în timpul uscării

În mod similar, o comparație a schimbărilor de culoare în alimentele uscate la soare și alimentele uscate la soare deschis este prezentată în Fig. 9. Mai mult, mai multe fructe suferă o reducere semnificativă a nivelului de acid ascorbic atunci când sunt expuse la lumina soarelui. Studiul raportat de Nasri și Belhamri (2018) se concentrează pe uscarea solară a cartofilor tăiați în trei forme diferite, explicând modul în care cinetica de uscare depinde de dimensiunea și forma produsului. Mai mult, metoda de uscare și alți parametri de proces influențează, de asemenea, comportamentul de rehidratare al produsului. Prin

urmare, alegerea uscătorului și a componentelor sale depinde în mare măsură de disponibilitatea produsului și de cerințele asociate. [Barrientos et al. \(2019\)](#) au evaluat efectul unui uscător solar cu acoperiș din plastic asupra calității senzoriale și chimice a boabelor de cacao. Rezultatele au arătat că aplicarea foliei de plastic semitransparente ar putea îmbunătăți semnificativ incidența radiațiilor solare, păstrând astfel calitatea cacao. Ca aspect important, uscarea excesivă a materialelor alimentare sensibile la căldură poate fi prevenită. Având în vedere aspectele de siguranță, alimentele uscate la soare pot fi preparate fără materiale străine și contaminare încrucișată, deoarece materialul alimentar care urmează să fie uscat nu este expus mediului direct (ca în cazul uscării la soare deschis). Cu toate acestea, trebuie să aveți grijă la utilizarea proiectelor de stocare a energiei termice cu desicante lichide, deoarece există posibilitatea de scurgere a desicantului lichid; Desicantul poate coroda suprafața metalică a uscătorului și, la rândul său, poate afecta calitatea alimentelor prin contaminare încrucișată.

Capitolul 12 - Provocări și direcții pentru cercetările viitoare

Cu o disponibilitate mai mare a insolației solare în zonele tropicale, aplicațiile de uscare care utilizează sisteme solare trebuie să fie simplificate (în design), rentabile și, în unele cazuri, pot fi aplicabile pentru a manipula mai multe tipuri de materiale alimentare. [Asemu et al. \(2020\)](#) au raportat o tehnologie de uscare a cerealelor cu costuri reduse prin dezvoltarea unui uscător solar cu bule pentru uscarea boabelor de porumb proaspăt recoltate. Uscarea s-a bazat pe prinderea radiației solare cu o foaie de plastic (LDPE) care acționează ca o bulă. Rezultatele au arătat că o creștere a frecvenței de amestecare ar putea reduce semnificativ timpul de uscare cu 5 până la 17%. Astfel de abordări pot fi explorate în continuare pentru aplicațiile în fermă. Într-un alt studiu recent, [Ananno et al. \(2020\)](#) ([Fig. 10](#)) a folosit un sistem hibrid de uscare a alimentelor auto-susținut. Uscătorul a fost integrat cu un sistem geotermal și s-a observat o îmbunătățire cu 20,5% a eficienței performanței colectorului solar convențional cu placă plată. Astfel, această tehnologie de energie hibridă aproape zero promite să fie rentabilă pentru aplicațiile rurale. Doar câteva rapoarte explică utilizarea eficientă a energiei solare în combinație cu alte surse de energie regenerabilă pentru a îmbunătăți eficiența uscătoarelor. Acest lucru explică necesitatea unei cercetări aprofundate în astfel de domenii de bioinginerie aplicată. Acest lucru se datorează faptului că o astfel de integrare a energiei solare cu alte sisteme de energie regenerabilă poate avea un impact pozitiv asupra eficienței de uscare, pe lângă faptul că este o tehnologie "verde".

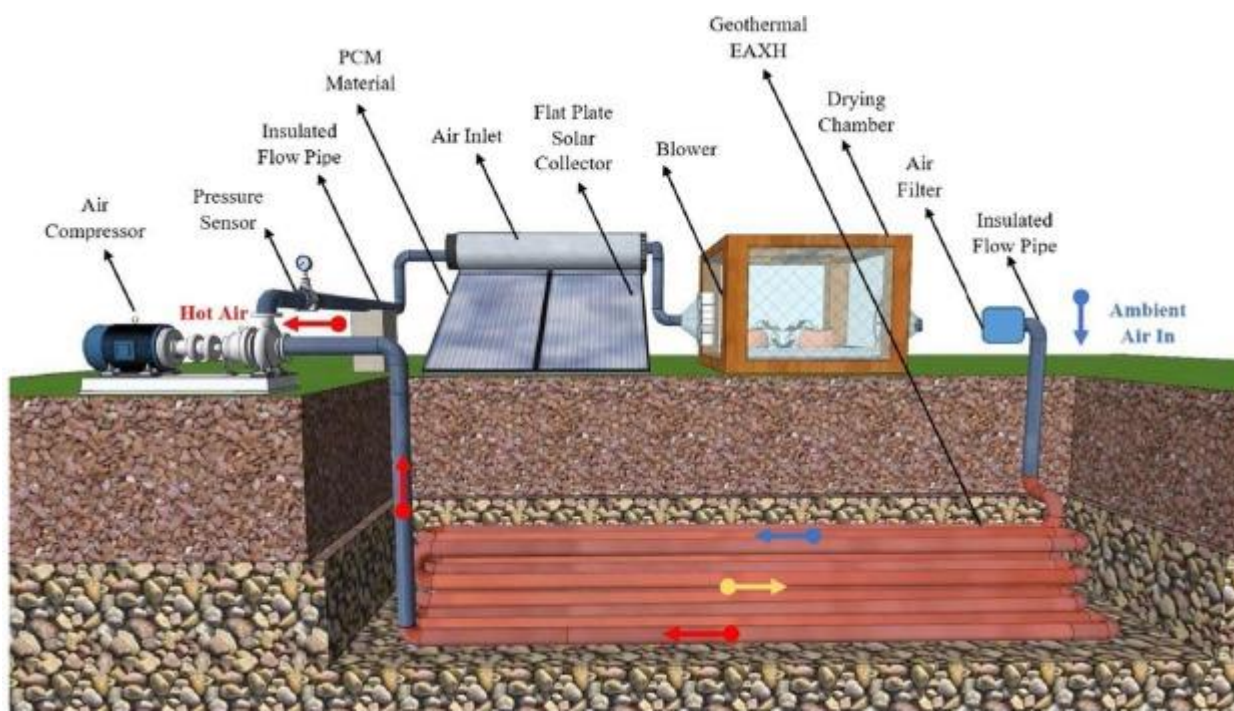


Figura 68. Funcționarea conceptuală a unui colector solar cu placă plană PCM geotermală hibridă (Sursa: [Ananno et al. 2020](#)).

Deși sistemele solare de uscare sunt durabile, implementarea lor pentru aplicații la nivel comercial este laborioasă. O altă cerință de cercetare este necesitatea de a dezvolta unități de uscare continuă pentru capacități de producție sporite. În funcție de locația geografică, viteza vântului și condițiile climatice, incidența energiei solare variază în timp, ceea ce duce la incertitudine și aplicabilitate limitată a uscătoarelor solare convenționale. Pentru a depăși acest lucru, trebuie luate în considerare cercetări suplimentare privind inovațiile de proiectare cu sisteme de rezervă de energie. Trebuie luate în considerare atât costurile de capital, cât și cele operaționale ale unor astfel de sisteme suplimentare. De exemplu, uscătoarele solare pot fi echipate cu unități de încălzire auxiliare alimentate cu celule fotovoltaice alimentate cu energie solară. Ca o abordare eficientă din punct de vedere al costurilor, apa caldă și pietricelele de pat pot fi utilizate și ca sisteme de stocare termică în uscătoarele solare. Într-un studiu recent, un nou PCM nano-îmbunătățit a fost raportat a fi util pentru sistemele de încălzire la temperatură scăzută. Efectul diferitelor tipuri de fluide (4% Al_2O_3 nanofluid; ulei de motor 10W40; glicerină și apă) cu privire la performanța unui colector solar cu jgheab parabolic experimentat pentru uscarea feliilor de mere ([Alimohammadi et al., 2020](#)). În comparație cu apa, celelalte fluide au prezentat îmbunătățiri ale eficienței generale de uscare (17,36 MJ, 18,46 MJ, 17,76 MJ și, respectiv, 16,80 MJ).

Alimentele sunt un material complex cu proprietăți fizico-chimice variate, niciun sistem de uscare solară nu funcționează bine pentru toate tipurile de produse alimentare. În funcție de tipul și natura produsului, eficiența performanței uscătoarelor solare variază și, prin urmare, necesită optimizarea procesului și a produsului specifică considerațiilor geografice. Chiar dacă uscarea solară pare a fi o abordare simplă, o înțelegere aprofundată a procesului complex de uscare este crucială pentru succesul sistemului de uscare dezvoltat. Mai mult, interdependența condițiilor meteorologice externe influențează rata de uscare. Având în vedere aplicațiile la scară largă, peisajul adecvat pentru implementarea permanentă a unor astfel de instalații de uscare este esențial. De asemenea, pentru aplicațiile comerciale, calitatea produsului uscat este un criteriu important care determină valoarea de piață, explicând cerința de rezerve eficiente de stocare a energiei cu instalații automate de întrerupere pentru controlul procesului de uscare.

Mai mult, automatizarea sistemelor de uscare solară se poate dovedi benefică. Cu toate acestea, astfel de caracteristici ar crește cerințele de costuri și ar limita cererile la nivel rural. O altă limitare majoră este perioada lungă de recuperare a investiției evidentă în cazul majorității unităților de uscare solară. Având în vedere meritele uscării solare, guvernele ar trebui să sporească sprijinul financiar pentru cercetarea și activitățile comerciale în această tehnologie durabilă, facilitând aplicarea sa pe scară mai largă pentru procesele comerciale.

Capitolul 13 - Componente recomandate pentru utilizare în proiect:

Sistem solar apa calda 120L, Colector 15 Tuburi, Boiler 120L 15 Tesy, grup pompare panou solar

Estimat livrare în: Popești-Leordeni

-15%

Livrare prin curier:
Livrare standard
Comanda pana la 12:00: livrare maine
190⁰⁰ Lei

Informatii:
✓ 14 zile drept de retur

4.532⁰⁰ Lei
3.814⁷⁹ Lei
Economisești: 15%
Vândut și livrat de: ELESAN SERV COM 4.3 ★
ultimul produs in stoc
Rate lunare de la
219⁰⁰ Lei
vezi detalii

Adauga in Cos

Adauga la Favorite

Smart Deals

REDUCERE 15%: Promoție valabilă de la data de 21-03-2025, în limita stocului disponibil.

Figura 69 - Sistem solar de apa calda

Panou solar apa calda Automatizat, inox, 150/195 Litri, BioSolar, 15 tuburi vidate, suport inox, kit complet panou solar apa calda Nepresurizat

[Share](#) [Compara](#)



★★★★★ 4.80 (5 review-uri)
100% clienti eMAG recomanda produsul

Estimat livrare în: Popești-Leordeni



Livrare prin curier:

Livrare standard

Comanda pana la 13:00: livrare maine
99⁰⁰ Lei



Informatii:

- ✓ 14 zile drept de retur
- ✓ Garantie inclusa: [detalii](#)
 - Persoane fizice: 36 luni

PRP: 2.140⁸¹ Lei

1.497⁰² Lei

Vândut și livrat de: Roimport Energie Solara 4.6 ★

În stoc

Rate lunare de la

86⁰⁰ Lei
[vezi detalii](#)



Adauga in Cos



Adauga la Favorite



Figura 70- Panou solar de apa calda

Kit solar fotovoltaic off grid Solid Volt, invertor 2000W 12/24 V, panou solar 200W, regulator/ controller 30A, baterie solara 20Ah Gel si 20 m cablu solar cabana, rulota, casa, autorulota, container, iluminat

[Share](#) [Compara](#)



Alege Putere maxima: 201 W

201 W

Estimat livrare în: Popești-Leordeni



Livrare prin curier:

Livrare standard

Vineri, 28 Mar. - Luni, 31 Mar.
20⁰⁰ Lei



Informatii:

- ✓ 14 zile drept de retur

1.520⁰⁰ Lei

Vândut și livrat de: Solid Volt 5 ★

În stoc

Rate lunare de la

87⁰⁰ Lei
[vezi detalii](#)



Adauga in Cos



Adauga la Favorite



Figura 71. Chit fotovoltaic

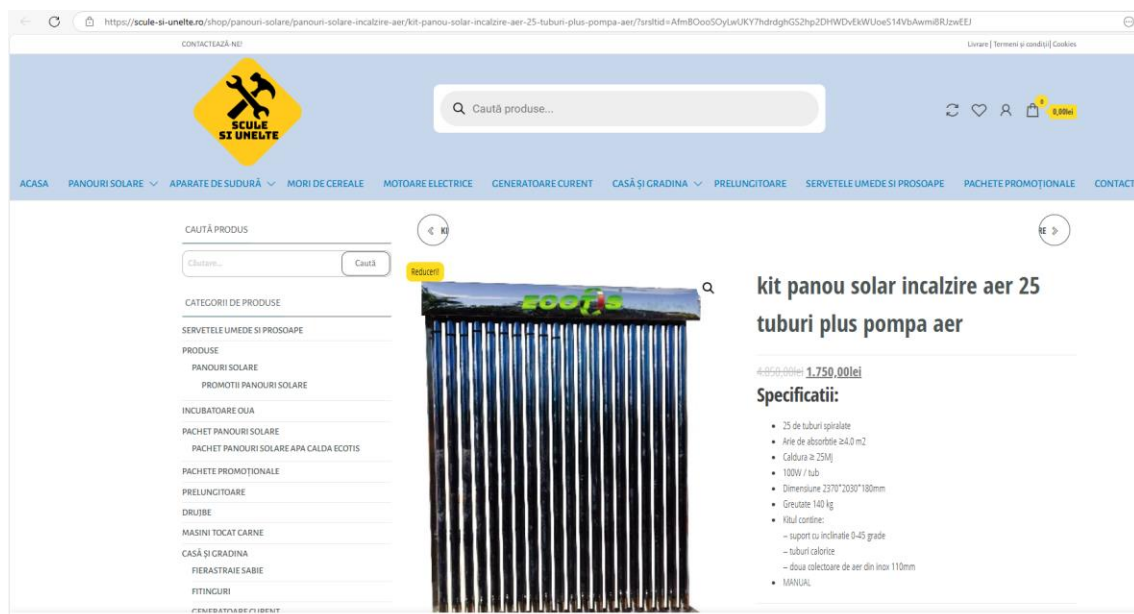


Figura 72. Chit panou solar incalzire aer

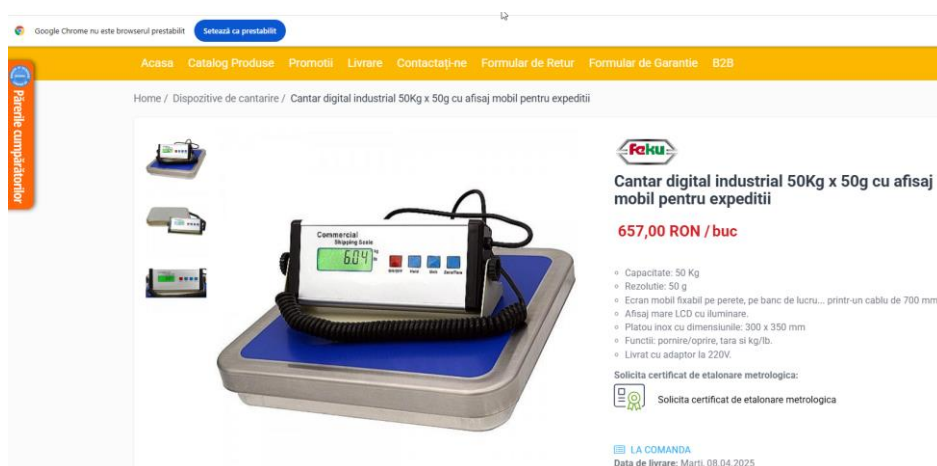


Figura 73. Cantar digital

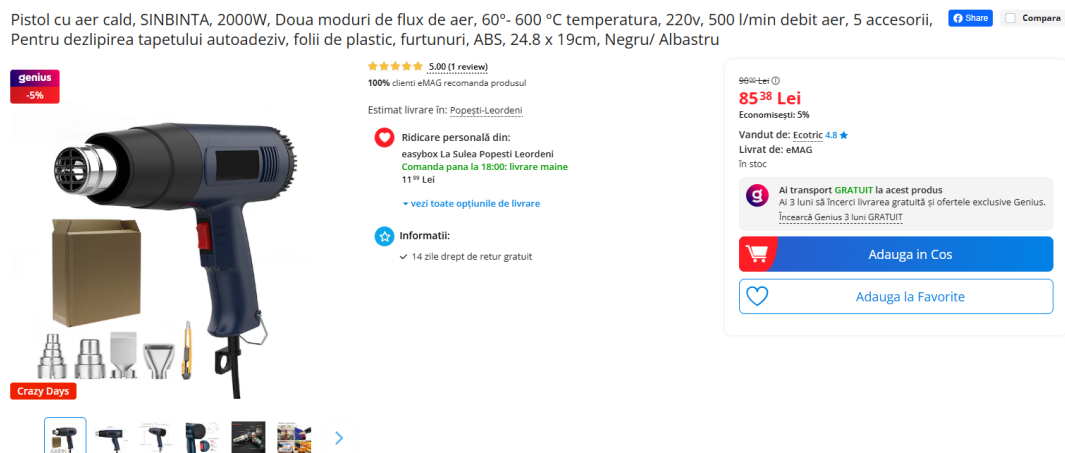


Figura 74. Pistol de aer cald

» ENERGIE REGENERABILA

Pompe De Caldura Geotermala

Panouri Fotovoltaice

Incalzire Solara a Aerului

Luminatoare

Unitati de incalzire solara a aerului



Unitatile de incalzire solara a aerului Solair pentru case si unitati industriale incalzesc aerul cu ajutorul energiei solare. Solair are ventilatoare pentru circulatia aerului alimentate de panouri fotovoltaice. Ventilatoarele trag aer din exterior sau interior, il trimt prin panou si apoi spre interior. Soarele incalzeste aerul ce trece prin suprafata panoului si astfel se obtine incalzire cu costuri zero si fara consum de energie.



Mai multe panouri pot fi conectate la acelasi sistem. Astfel se obtine o capacitate mai mare de incalzire. Sistemul Solair este unul ce promoveaza energia verde, protectia mediului, contribuie la crestarea punctajului Lead Certificate. Solair asigura o energie curata si reducerea emisiilor de carbon in atmosfera. Solair ofera solutia incalzirii interiorului cu ajutorul energiei solare. Solair nu are nevoie de energie electrica sau combustibili fosili pentru functionare.

Avantajele sistemului Solair:

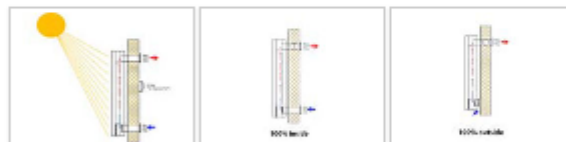
- Reduce costurile de incalzire.
- In zilele insorite ofera incalzire gratuita.
- Va creste punctajul in sistem Lead. (contribuie la certificarea Lead)
- Cand este conectat la o sursa externa de aer, curata aerul din interior.

Cum functioneaza?



Unitatile sunt controlate cu ajutorul unui termostat. Daca termostatul este pe pozitia „on/pornit” si valoarea temperaturii setate este mai mare decat cea din interior, unitatea actioneaza ventilatoarele atunci cand primeste energie solara.

Actionarea ventilatoarelor se face in functie de tipul de instalare, respectiv trage aer din interior sau din exterior si il trimite apoi prin interiorul panoului. Aerul trece prin panoul cu conductele de aluminiu ce au fost incalzite de soare si apoi este directionat catre interior. Cand se ajunge la temperatura dorita sau termostatul este pe pozitia „off/oprit”, sistemul se opreste.



Eficienta sistemelor Solair

Modelele Solair SA-12 au o suprafata 1,82m² care este special vopsita pentru absorbtia energiei solare. Puterea de incalzire va fi de 1200 W la un unghi fata de soare de 90 grade. Un ansamblu de incalzire format dintr-un panou circula un volum de aer de 120m³/h. In acest caz, va incalzi aerul cu 40°C. Daca temperatura din interior este de 15°C, abund aerul introdus poate fi de pana la 55°C. Conform acestor valori, suprafata incalzita va fi de 30-35 m². (suprafata poate varia in functie de natura constructiei).

Pentru casele de vacanta ce sunt folosite doar pentru perioada verii si sunt inchise lama, Solair previne aparitia mușcăluțului, prelungind durata de viata pentru suprafetale vopsite sau varul, precum si a mobilier.

Specificatii Tehnice:

Technical Specifications

Model	SA-12
Dimensions (mm)	1940 x 940 x 110 mm
Black Surface	1.82 m ² -Aluminum
Panel Frame	Anodized Aluminum
Glass	4 mm tempered
Insulation	50 mm Rock wool
Control	Room thermostat
Solar Cell (PV)	12W-18V
Fan	5W x 2
Air Flow	180 m ³ /h (Free blowing) 120 m ³ /h (2 louver+30 cm x 2 duct) 90 m ³ /h (2 louver +backdraft damper + 30 cm x 2 duct)

Figura 75. Panou solar incalzire aer

de fază (PCM) și simulările de dinamică a fluidelor computaționale (CFD), pentru a optimiza sistemele de uscare solară și pentru a îmbunătăți aplicabilitatea acestora în diverse condiții climatice și la o scară mai largă.

Fiind un proces intensiv în energie, uscarea (încălzirea) reprezintă peste 25% din necesarul total de energie din industria alimentară. Având în vedere disponibilitatea surplusului de energie solară, trebuie întreprinse cercetări intensive pentru dezvoltarea de uscătoare solare eficiente, având în vedere necesitatea de a dezvolta strategii durabile de procesare a alimentelor pentru viitor, acestea nu trebuie să rămână limitate la aplicațiile rurale. Următoarele aspecte necesită atenție imediată:

- Studii avansate privind fotovoltaica, sisteme de stocare termică, colectoare solare durabile și eficiente cu costuri reduse și surse auxiliare de energie regenerabilă integrate cu sistemele convenționale de uscare solară;
- Implementarea uscătoarelor solare mixte împreună cu alte surse de energie regenerabilă la nivel de fermă, deoarece acestea pot reduce semnificativ pierderile de depozitare și procesare. De asemenea, pot îmbunătăți randamentele prin prelucrarea primară, în special în țările în curs de dezvoltare;
- Dezvoltarea de noi materiale de stocare a energiei pentru a îmbunătăți performanța uscătoarelor, luând în considerare și implicațiile lor asupra calității alimentelor uscate;
- Analize detaliate ale materialelor existente și descoperirea de noi sisteme de stocare termică latentă bazată pe căldură folosind PCM (inclusiv materiale organice, anorganice și eutectice);
- Integrarea aplicațiilor computerizate pentru uscarea solară, prin modelare, aplicații TIC pentru supraveghere, control și automatizare;
- Analiza detaliată a operațiunilor simultane ale unității: de exemplu, uscarea și gătirea sau uscarea cu desalinizarea apei, oferind posibilitatea utilizării maxime a energiei solare.

Cu un rezumat exhaustiv al mai multor aplicații de uscare solară raportate în ultimii 5 ani, această revizuire evidențiază importanța uscării solare în țările în curs de dezvoltare din regiunea tropicală. Pentru a completa acest lucru, această lucrare raportează o revizuire cuprinzătoare a rapoartelor recente, explicând sistemele convenționale de uscare solară, variantele îmbunătățite, provocările existente și cerințele de cercetare.

Referinte

- [1] C. Heijnen, Uscarea solară a fructelor și legumelor. Pakistan J. Agric. Res., 5 (1) (2002), pp. 1-6, [Google Academic](#)
- [2] S. Silveira, Economia solară: energie regenerabilă pentru un viitor global durabil Hermann Scheer, vol. 3, Earthscan Publications Ltd., Marea Britanie (2002), p. 367, [10.1016/s1469-3062\(03\)00018-4](#), [Vezi la editorulGoogle Academic](#)
- [3] R. Fortunatus, R. Marealle, N. Nenguwo și T. Stoilova, "Uscătoare solare". [Google Academic](#)
- [4] P. Rajkumar, S. Kulanthaisami, G.S.V. Raghavan, Y. Gariépy, V. Orsat, Cinetica de uscare a feliilor de roșii în metode de uscare solară asistată de vid și la soare deschis, Uscat. Technol., 25 (7-8) (2007), pp. 1349-1357, [10.1080/07373930701438931](#), [Vizualizare la editorGoogle Scholar](#)
- [5] H. El Hage, A. Herez, M. Ramadan, H. Bazzi, M. Khaled, O investigație privind uscarea solară: o analiză cu evaluare economică și de mediu, Energy, 157 (2018), pp. 815-829, [10.1016/j.energy.2018.05.197](#), [Vezi articolul](#)
- [6] Un. Chavan, V. Vitankar, A. Mujumdar, n. Thorat, Uscătoare solare cu convecție naturală și tip direct (NCDT): o recenzie, Uscat. Technol., 39 (13) (2021), pp. 1969-1990, [10.1080/07373937.2020.1753065](#), [Vizualizare la editorGoogle Scholar](#)
- [7] Y. Mohana, R. Mohanapriya, T. Anukiruthika, K.S. Yoha, J.A. Moise, C. Anandharamakrishnan, Uscătoare solare pentru aplicații alimentare: concepte, modele și progrese recente, Sol. Energy, 208 (iulie) (2020), pp. 321-344, [10.1016/j.solener.2020.07.098](#), [Vezi articolul](#)
- [8] B. Ameri, S. Hanini, A. Benhamou, D. Chibane, Abordarea comparativă a performanței de uscare solară directă și indirectă a nămolului de la stațiile de epurare, evaluare experimentală și teoretică, Sol. Energy, 159 (noiembrie 2016) (2018), pp. 722-732, [10.1016/j.solener.2017.11.032](#), [Vezi articolul](#)
- [9] J.A. Moise, D.S. Jayas, K. Alagusundaram, Rezistența la fluxul de aer prin cereale în vrac, semințe oleaginoase și alte produse agricole - o recenzie, J. Agric. Eng., 50 (4) (2013), pp. 1-13, [Vizualizare la editorCrossrefGoogle Academic](#)

- [10] Un. EL khadraoui, I. Hamdi, S. Kooli, A. Guizani, Uscarea feliilor de ardei roșu într-un uscător de seră solară și sub soare deschis: investigații experimentale și matematice, *Inovați. Food Sci. Emerg. Technol.*, 52 (aprilie 2018) (2019), pp. 262-270, [10.1016/j.ifset.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.01.001), [Vezi articolul](#)
- [11] W.B. Chaouch, A. Khellaf, A. Mediani, M.E.A. Slimani, A. Loumani, A. Hamid, Investigarea experimentală a unui uscător solar activ direct și indirect cu stocare sensibilă a căldurii pentru uscarea cărnii de cămilă în mediul saharian, *Sol. Energy*, 174 (aprilie) (2018), pp. 328-341, [10.1016/j.solener.2018.09.037](https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.037), [Vezi articolul](#)
- [12] P.N. Sarsavadia, Dezvoltarea unui uscător asistat de energie solară și evaluarea necesarului de energie pentru uscarea cepei, *Reînnoi. Energy*, 32 (15) (2007), pp. 2529-2547, [10.1016/j.renene.2006.12.019](https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.019), [Vezi articolul](#)
- [13] B. Koçak, A.I. Fernandez, H. Paksoy, Revizuirea stocării sensibile a energiei termice pentru aplicații solare industriale și aspecte de sustenabilitate, *Sol. Energy*, 209 (august) (2020), pp. 135-169, [10.1016/j.solener.2020.08.081](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.081), [Vezi articolul](#)
- [14] D. Jain, P. Tewari, Performanța uscătorului solar convectiv natural cu schimbare de fază, *Reînnoi. Energy*, 80 (2015), pp. 244-250, [10.1016/j.renene.2015.02.012](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.012), [Vezi articolul](#)
- [15] P. Pankaew, O. Aumporn, S. Janjai, S. Pattarapanitchai, M. Sangsan, B.K. Bala, Performanța unui uscător solar de seră la scară largă integrat cu un sistem de stocare termică a materialului cu schimbare de fază pentru uscarea ardei iute, *Int. J. Green Energy*, 17 (11) (2020), pp. 632-643, [10.1080/15435075.2020.1779074](https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1779074), [Vizualizare la editorGoogle Scholar](#)
- [16] D. Singh, P. Mall, Investigarea experimentală a performanței termice a uscătorului solar în mod indirect cu material cu schimbare de fază pentru felii de banane, *Surse de energie, Partea A Recuperare. Util. Mediu. Ef.* (2020), [10.1080/15567036.2020.1810825](https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1810825), [Vezi la editorulGoogle Academic](#)
- [17] V.M. Swami, A.T. Autee, A. T R, Analiza experimentală a uscătorului solar de pește folosind material cu schimbare de fază, *J. Energy Storage*, 20 (669) (2018), pp. 310-315, [10.1016/j.est.2018.09.016](https://doi.org/10.1016/j.est.2018.09.016), [Vezi articolul](#)

- [18] Akinola, A.O; și Fapetu, O.P. 2006. Analiza exergetică a unei analize mixte mod uscător solar. Jurnalul de energie solară și aplicată. Știință. 1 : 205-10.
- [19] Bahnasawy, A.J și Shenana, J.R. 2004. Evaluarea unui uscător solar de culturi pentru aplicații rurale în Botswana. Botswana Journal Technology 11(2): 58-62.
- [20] Sebaei, S; Balladin, D.A și Headley, O. 2002. Uscător solar cu termic încălzitor de rezervă pentru stocare și biomasă, Solar Energy, vol. 81, pp. 449-462, 2007
- [21] Karathanos, K și Belessiotis, L. 2002. Uscător solar cu convecție naturală cu încălzitor de rezervă pe biomasă, Solar Energy, vol. 72, pp. 75-83.
- [22] Tiwari S, Tiwari GN, Al-Helal IM. Development and recent trends in greenhouse dryer: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;65:1048-1064. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.070
- [23] Arjun Singh K, Muthuvairavan G, Natarajan SK. Numerical investigation of modified conical cavity receiver with different heat transfer fluids. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. 2023;45:6964-6980. DOI: 10.1080/15567036.2023.2218833
- [24] Muthuvairavan G, Natarajan SK. Large-scale solar desalination system. In: A. T.V, V. Selvaraj, M. M. M, editors. In: Solar Thermal Conversion Technologies for Industrial Process Heating. 1st ed. Boca Raton: Taylor & Francis; 2023. pp. 169-199. DOI: 10.1201/9781003263326-9
- [25] Kumar M, Sansaniwal SK, Khatak P. Progress in solar dryers for drying various commodities. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;55:346-360. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.158
- [26] Parhizi Z, Karami H, Golpour I, Kaveh M, Szymanek M, Blanco-Marigorta AM, et al. Modeling and optimization of energy and exergy parameters of a hybrid-solar dryer for basil leaf drying using RSM. Sustainability. 2022;14:1-27. DOI: 10.3390/su14148839
- [27] Elangovan E, Natarajan SK. Effects of pre-treatments on quality attributes, moisture diffusivity, and activation energy of solar dried ivy gourd. Journal of Food Process Engineering. 2021;44:1-14. DOI: 10.1111/jfpe.13653
- [28] EL-Mesery HS, EL-Seesy AI, Hu Z, Li Y. Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. Renewable and

Sustainable Energy Reviews. 2022;157:112070. DOI: 10.1016/j.rser.2021.112070

[29] Fudholi A, Sopian K, Ruslan MH, Alghoul MA, Sulaiman MY. Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010;14:1-30. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.032

[30] Jairaj KS, Singh SP, Srikant K. A review of solar dryers developed for grape drying. Solar Energy. 2009;83:1698-1712. DOI: 10.1016/j.solener.2009.06.008

[31] Fudholi A, Sopian K, Bakhtyar B, Gabbasa M, Othman MY, Ruslan MH. Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015;51:1191-1204. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.026

[32] Mustayen AGMB, Mekhilef S, Saidur R. Performance study of different solar dryers: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;34:463-470. DOI: 10.1016/j.rser.2014.03.020

[33] El Hage H, Herez A, Ramadan M, Bazzi H, Khaled M. An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment. Energy. 2018;157:815-829. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.197

[34] Prakash O, Laguri V, Pandey A, Kumar A, Kumar A. Review on various modelling techniques for the solar dryers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;62:396-417. DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.028

[35] Kamarulzaman A, Hasanuzzaman M, Rahim NA. Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review. Solar Energy. 2021;221:559-582. DOI: 10.1016/j.solener.2021.04.056

[36] Jha A, Tripathy PP. Recent advancements in design, application, and simulation studies of hybrid solar drying technology. Food Engineering Reviews. 2021;13:375-410. DOI: 10.1007/s12393-020-09223-2

[37] Nukulwar MR, Tungikar VB. A review on performance evaluation of solar dryer and its material for drying agricultural products. Materials Today Proceedings. 2021;46:345-349. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.354

Bibliografie

1. Adegoke, C.O și Bolaji, B.O. 2000. Evaluarea performanței sistemului solar sistem de apă caldă cu termosifon acționat în Akure, Jurnalul Internațional de tehnologie. 2(1): 35-40.
2. Alamu, O.J; Nwaokocha, C.N și Adunola, O. 2010. Proiectare și construcția unui uscător solar de alimente pasiv de uz casnic, Leonardo Journal of Științe, p. 71-82.
3. Bena, B și Fuller, RJ 2002. Determinarea coeficientului mediu de transfer intern de umiditate în timpul uscării unui pat subțire de cartof Felii. Jurnalul de inginerie alimentară. 48(2):95-101.
4. Bolaji, B.O. 2005. Evaluarea performanței unui uscător solar simplu pentru conservarea alimentelor. Proc. 6Th Ann. Inginerie. Conf. de Școală de Inginerie și tehnologie inginerască, Minna, Nigeria, pp. 8-13.
5. Ericson, J. 1980. Măsurători globale ale radiației solare în Anglia. Energie regenerabilă, 30(3):1203—1220.
6. Ghazanfari, A și Sokhansanj, S. 2002. Experimente privind uscarea solară a Fistic. Managementul conversiei energiei 27: 343-349.
7. Janjaia, S; Srisittipokakuna, N; și Balab, B.K. 2008. Experimentale și modelarea performanțelor unui sistem de uscare solară integrat pe acoperiș pentru uscarea ierburilor și condimentelor. Jurnalul de Energie 33:91–10346
8. Karathanos, K și Belessiotis, L. 2002. Uscător solar cu convecție naturală cu încălzitor de rezervă pe biomasă, Solar Energy, vol. 72, pp. 75-83.
9. Khalil, E.J; Al-Juamily, Khalifa, N; și Yassen, T.A. 2007. Testarea performanța unui sistem solar de uscare a fructelor și legumelor în Irak. Jurnalul de desalinizare. 209: 163–170
10. Kurtbas, I și Turgut, E. 2006. Investigarea experimentală a unui tip uscător solar cu convecție naturală. Conversia energiei și Management, 43(16): 2251-2266
11. Uscătoare solare: perspective tehnice și tendințe bibliometrice în tehnologiile energetice
12. Villagran, E.; Henao-Rojas, J.C.; Franco, G. Performanța termo-ecologică a patru forme diferite de uscător solar de seră cu principiu de funcționare prin convecție liberă și fără sarcină pe produs. *Fluide* **2021**, 65, 183. [Google Academic] [Ref încrucișat]

- 13.Hao, W.; Zhang, H.; Liu, S.; Lai, Y. Metoda de proiectare și predicție a sistemului de uscare a energiei solare cu mediu de lucru dual. *Appl. Therm. Eng.* **2021**, *195*, 117153. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 14.Fernandes, L.; Fernandes, J.R.; Tavares, P.B. Proiectarea unui uscător solar de alimente prietenos pentru supraproducția internă. *Solar* **2022**, *2*, 495–508. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 15.Elzubeir, A.O. Deshidratarea solară a cepei feliate. *Int. J. Veg. Sci.* **2014**, *20*, 264–269. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 16.Fernandes, L.; Tavares, P.B. O recenzie asupra dispozitivelor de uscare solară: transfer de căldură, mișcarea aerului și tipul camerelor. *Solar* **2024**, *4*, 15–42. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 17.Kumar, M.; Sansaniwal, S.K.; Khatak, P. Progresul uscătoarelor solare pentru uscarea diferitelor mărfuri. *Reînnoi. Susține. Energie Rev.* **2016**, *55*, 346–360. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 18.Prakash, O.; Kumar, A. Revizuire istorică și tendințe recente în sistemele de uscare solară. *Int. J. Energie verde* **2013**, *10*, 690–738. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 19.Kumar, M.; Sahdev, R.K.; Tiwari, S.; Manchanda, H.; Chhabra, D.; Panchal, H.; Sadasivuni, K.K. Performanța termică și analiza cinetică a vermicelli care se usucă în interiorul unei sere pentru dezvoltare durabilă. *Susține. Energy Technol. Evaluatează.* **2021**, *44*, 101082. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 20.Tiwari, S.; Tiwari, G.N.; Al-Helal, I.M. Dezvoltarea și tendințele recente în uscătorul de seră: o revizuire. *Reînnoi. Susține. Energie Rev.* **2016**, *65*, 1048–1064. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 21.Siddiqui, S.A.; Ucak, İ.; Jain, S.; Elsheikh, W.; Ali Redha, A.; Kurt, A.; Toker, O.S. Impactul uscării asupra proprietăților tehnofuncționale și nutriționale ale proteinelor alimentare și carbohidraților - O revizuire cuprinzătoare. *Uscat. Technol.* **2024**, *42*, 592–611. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 22.Radhakrishnan, G.; Breaz, T.O.; Al Mahrouqi, A.W.A.; Al Zakwani, N.A.; Al Fahdi, M.H.; Al Shuraiqi, A.S.; Al Awamri, S.A.; Al Aamri, R.S.; Karthikeyan, K.R. O analiză comparativă a managementului privind performanța diferitelor metode de uscare solară pentru uscarea legumelor și fructelor. *Sustenabilitate* **2024**, *16*, 775. [Google Academic] [Ref încrucișat]

23. Natarajan, S.K.; Elavarasan, E. O revizuire a analizei dinamicii fluidelor computaționale pe uscătorul de seră. În *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Bogor, Indonezia, 29 august 2019; IOP Publishing: Bristol, Marea Britanie, 2019; Volumul 312, p. 12033. [**Google Scholar**]
24. Román-Roldán, N.I.; Yudonago, J.F.I.; López-Ortiz, A.; Rodríguez-Ramírez, J.; Sandoval-Torres, S. Un nou sistem de recirculare a aerului pentru uscarea solară omogenă: abordare computațională a dinamicii fluidelor. *Reînnoi. Energie* **2021**, *179*, 1727–1741. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]
25. Demissie, Y.A.; Abreham, R.E.; Wassie, H.M.; Getie, M.Z. Progrese în uscătoarele solare de seră pentru uscarea culturilor. *Rep. Energie* **2024**, *11*, 5046–5058. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]
26. Kavya, V.S.; Ramana, A.S. Tendințe recente în uscătoarele solare integrate PCM. *Eng. Proc.* **2024**, *61*, 6. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]
27. Delgado-Plaza, E.; Peralta-Jaramillo, J.; Quilambaqui, M.; Gonzalez, O.; Reinoso-Tigre, J.; Arevalo, A.; Arancibia, M.; Paucar, M.; Velázquez-Martí, B. Evaluarea termică a unui uscător hibrid cu energie solară și geotermală pentru aplicații agroindustriale. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 4079. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]
28. Barbosa, E.G.; de Araujo, M.E.V.; de Oliveira, A.C.L.; Martins, MA. Sisteme de stocare a energiei termice aplicate uscătoarelor solare: clasificare, performanță și modelare numerică: o revizuire actualizată. *Case Stud. Therm. Eng.* **2023**, *45*, 102986. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]
29. Firfiris, V.K.; Kaffe, Z.D.; Kalamaras, S.D.; Lithourgidis, A.A.; Martzopoulou, A.G.; Kotsopoulos, T.A. Un prototip de sistem de uscare solară pasivă: exploatarea efectului de coș solar pentru uscarea cartofilor și bananelor. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 11784. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]
30. Marongiu, F.; Soprani, S.; Engelbrecht, K. Modelarea stocării energiei termice la temperaturi ridicate în straturile de roci – Comparație experimentală și studiu parametric. *Appl. Therm. Eng.* **2019**, *163*, 114355. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]
31. Srinivasan, G.; Rabha, D.K.; Muthukumar, P. O recenzie asupra uscătoarelor solare integrate cu unități de stocare a energiei termice pentru uscarea produselor agricole și alimentare. *Sol. Energie* **2021**, *229*, 22–38. [**Google Academic**] [**Ref încrucișat**]

- 32.Kitchenham, B. Proceduri pentru efectuarea revizuirilor sistematice. *Keele Marea Britanie Keele Univ.* **2004**, 33, 1-26. [Google Scholar]
- 33.Liberati, A.; Altman, D.G.; Tetzlaff, J.; Mulrow, C.; Gøtzsche, P.C.; Ioannidis, J.P.; Moher, D. Declarația PRISMA pentru raportarea recenziilor sistematice și meta-analizelor studiilor care evaluează intervențiile de îngrijire a sănătății: explicație și elaborare. *PLoS Med.* **2009**, 6, e1000100. [Google Academic] [Ref încrucișat] [PubMed]
- 34.Enarevba, D.R.; Haapala, K.R. Industria emergentă a cânepei: o revizuire a materialelor industriale de cânepă și a fabricării produselor. *AgriEngineering* **2024**, 6, 2891–2925. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 35.Villagran, E.; Ortiz, G.A.; Mojica, L.; Flores-Velasquez, J.; Aguilar, C.E.; Gomez, L.; Antolinez, E.; Numa, S. Studiu bibliometric al cercetării florilor tăiate. *Ornam. Hortic.* **2023**, 29, 500–514. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 36.Herrera-Franco, G.; Montalván-Burbano, N.; Carrión-Mero, P.; Bravo-Montero, L. Cercetare la nivel mondial privind socio-hidrologia: o analiză bibliometrică. *Apă* **2021**, 13, 1283. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 37.Oliński, M.; Krukowski, K.; Sieciński, K. Prezentare bibliometrică a ChatGPT: noi perspective în științele sociale. *Publicații* **2024**, 12, 9. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 38.Salinas-Velandia, D.A.; Romero-Perdomo, F.; Numa-Vergel, S.; Villagrán, E.; Donado-Godoy, P.; Galindo-Pacheco, J.R. Perspective în horticultura circulară: difuzarea cunoștințelor, circulația resurselor, abordarea One Health și tehnologiile cu efect de seră. *Int. J. Environ. Res. Sănătate publică* **2022**, 19, 12053. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 39.Briones-Bitar, J.; Carrión-Mero, P.; Montalván-Burbano, N.; Morante-Carballo, F. Cercetarea căderii de pietre: o analiză bibliometrică și tendințe viitoare. *Geoștiințe* **2020**, 10, 403. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 40.Passas, I. Analiza bibliometrică: pașii principali. *Enciclopedia* **2024**, 4, 1014–1025. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 41.Aria, M.; Cuccurullo, C. Bibliometrix: un instrument R pentru analiza cuprinzătoare a cartografierii științifice. *J. Informetr.* **2017**, 11, 959–975. [Google Academic] [Ref încrucișat]
- 42.Rocha, G.A.O.; Vergel, S.J.N.; Arias, L.G.; Giraldo, Y.R.; Villagran, E. La Técnica Del Cultivo Sin Suelo y Su Contribución Al Mejoramiento Tecnológico de La Agricultura Bajo Cubierta: Un Análisis

- Bibliométrico. *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.* **2022**, 6, 7053–7074. [Google Scholar]
43. Villagrán, E.; Romero-Perdomo, F.; Numa-Vergel, S.; Galindo-Pacheco, J.R.; Salinas-Velandia, D.A. Evaluarea ciclului de viață în agricultura protejată: unde suntem acum și unde ar trebui să mergem în continuare? *Horticulturae* **2023**, 10, 15. [Google Academic] [Ref încrucișat]
 44. Carrión-Mero, P.; Montalván-Burbano, N.; Paz-Salas, N.; Morante-Carballo, F. Volcanic Geomorphology: A Review of Worldwide Research. *Geosciences* **2020**, 10, 347. [Google Scholar] [CrossRef]
 45. Saini, R.K.; Saini, D.K.; Gupta, R.; Verma, P.; Thakur, R.; Kumar, S. Technological Development in Solar Dryers from 2016 to 2021-A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2023**, 188, 113855. [Google Scholar] [CrossRef]
 46. Hin, L.; Buntong, B.; Mean, C.M.; Chhoem, C.; Prasad, P.V.V. Impacts of Using Solar Dryers on Socio-Economic Conditions of Dried Fish Processors in Cambodia. *Sustainability* **2024**, 16, 2130. [Google Scholar] [CrossRef]
 47. Hadibi, T.; Mennouche, D.; Boubekri, A.; Chouicha, S.; Arıcı, M.; Yunfeng, W.; Ming, L.; Fang-ling, F. Drying Characteristic, Sustainability, and 4E (Energy, Exergy, and Enviro-Economic) Analysis of Dried Date Fruits Using Indirect Solar-Electric Dryer: An Experimental Investigation. *Renew. Energy* **2023**, 218, 119291. [Google Scholar] [CrossRef]
 48. Cetina-Quiñones, A.J.; Santamaria-Bonfil, G.; Medina-Esquivel, R.A.; Bassam, A. Techno-Economic Analysis of an Indirect Solar Dryer with Thermal Energy Storage: An Approach with Machine Learning Algorithms for Decision Making. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2023**, 45, 102131. [Google Scholar] [CrossRef]
 49. Carrión-Mero, P.; Montalván-Burbano, N.; Herrera-Narváez, G.; Morante-Carballo, F. Geodiversity and Mining towards the Development of Geotourism: A Global Perspective. *Int. J. Des. Nat. Ecodyn.* **2021**, 16, 191–201. [Google Scholar] [CrossRef]
 50. Manzanet, J.E.A. El Artículo de Revisión y Su Importancia En La Literatura Científica. *Rev. Cuba. Salud Pública* **2022**, 48, e3719. [Google Scholar]

51. Yuen, J. Comparison of Impact Factor, Eigenfactor Metrics, and SCImago Journal Rank Indicator and h-Index for Neurosurgical and Spinal Surgical Journals. *World Neurosurg.* **2018**, *119*, e328–e337. [Google Scholar] [CrossRef]
52. Holechek, J.L.; Geli, H.M.E.; Sawalhah, M.N.; Valdez, R. A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? *Sustainability* **2022**, *14*, 4792. [Google Scholar] [CrossRef]
53. Le, T.S.; Le, T.H.; Pham, M.T.; MinhCity, H.C. A Review of the Indirect Solar Dryer with Sensible Heat Storage Mediums. *J. Mech. Eng. Res. Dev.* **2021**, *44*, 131–140. [Google Scholar]
54. Rocha, G.A.O.; Pichimata, M.A.; Villagran, E. Research on the Microclimate of Protected Agriculture Structures Using Numerical Simulation Tools: A Technical and Bibliometric Analysis as a Contribution to the Sustainability of Under-Cover Cropping in Tropical and Subtropical Countries. *Sustainability* **2021**, *13*, 10433. [Google Scholar] [CrossRef]
55. El-Mesery, H.S.; El-Seesy, A.I.; Hu, Z.; Li, Y. Recent Developments in Solar Drying Technology of Food and Agricultural Products: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2022**, *157*, 112070. [Google Scholar] [CrossRef]
56. Daş, M.; Aliç, E.; Kavak Akpınar, E. Numerical and Experimental Analysis of Heat and Mass Transfer in the Drying Process of the Solar Drying System. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* **2021**, *24*, 236–246. [Google Scholar] [CrossRef]
57. Purna Prakash, K.; Venkata Pavan Kumar, Y.; Himajyothi, K.; Pradeep Reddy, G. Comprehensive Bibliometric Analysis on Smart Grids: Key Concepts and Research Trends. *Electricity* **2024**, *5*, 75–92. [Google Scholar] [CrossRef]
58. Bal, L.M.; Satya, S.; Naik, S.N. Solar Dryer with Thermal Energy Storage Systems for Drying Agricultural Food Products: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2010**, *14*, 2298–2314. [Google Scholar] [CrossRef]
59. Lingayat, A.B.; Chandramohan, V.P.; Raju, V.R.K.; Meda, V. A Review on Indirect Type Solar Dryers for Agricultural Crops–Dryer Setup, Its Performance, Energy Storage and Important Highlights. *Appl. Energy* **2020**, *258*, 114005. [Google Scholar] [CrossRef]
60. Lakshmi, D.V.N.; Muthukumar, P.; Layek, A.; Nayak, P.K. Drying Kinetics and Quality Analysis of Black Turmeric (*Curcuma Caesia*) Drying in a Mixed Mode Forced Convection Solar Dryer Integrated with Thermal

- Energy Storage. *Renew. Energy* **2018**, *120*, 23–34. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
61. Kant, K.; Shukla, A.; Sharma, A.; Kumar, A.; Jain, A. Thermal Energy Storage Based Solar Drying Systems: A Review. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2016**, *34*, 86–99. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 62. Slimani, M.E.A.; Amirat, M.; Bahria, S.; Kurucz, I.; Sellami, R. Study and Modeling of Energy Performance of a Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Collector: Configuration Suitable for an Indirect Solar Dryer. *Energy Convers. Manag.* **2016**, *125*, 209–221. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 63. Bal, L.M.; Satya, S.; Naik, S.N.; Meda, V. Review of Solar Dryers with Latent Heat Storage Systems for Agricultural Products. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, *15*, 876–880. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 64. Okeniyi, P.O.; Akinyemi, M.L.; Abodunrin, T.J.; Ayara, W.A.; Obatare, M.I. Assessing the Performance of a Blackbody Solar Dryer. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2023; Volume 1197, p. 12008. [[Google Scholar](#)]
 65. Devahastin, S.; Pitaksuriyarat, S. Use of Latent Heat Storage to Conserve Energy during Drying and Its Effect on Drying Kinetics of a Food Product. *Appl. Therm. Eng.* **2006**, *26*, 1705–1713. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 66. Bala, B.K.; Ashraf, M.A.; Uddin, M.A.; Janjai, S. Experimental and Neural Network Prediction of the Performance of a Solar Tunnel Drier for Drying Jackfruit Bulbs and Leather. *J. Food Process Eng.* **2005**, *28*, 552–566. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 67. Janjai, S.; Bala, B.K. Solar Drying Technology. *Food Eng. Rev.* **2012**, *4*, 16–54. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 68. Morante-Carballo, F.; Montalván-Burbano, N.; Carrión-Mero, P.; Espinoza-Santos, N. Cation Exchange of Natural Zeolites: Worldwide Research. *Sustainability* **2021**, *13*, 7751. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 69. Arslan, E.; Aktaş, M. 4E Analysis of Infrared-Convective Dryer Powered Solar Photovoltaic Thermal Collector. *Sol. Energy* **2020**, *208*, 46–57. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 70. Kondareddy, R.; Natarajan, S.; Radha Krishnan, K.; Saikia, D.; Singha, S.; Nayak, P.K. Performance Evaluation of Modified Forced Convection Solar Dryer with Energy Storage Unit for Drying of Elephant Apple (*Dillenia Indica*). *J. Food Process Eng.* **2022**, *45*, e13934. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

71. Manisha; Tiwari, S.; Chhabra, D.; Kumari, M.; Tiwari, P.; Sahdev, R.K. Recent Developments on Photovoltaic Thermal Drying Systems: A Clean Energy Production. *Clean Technol. Environ. Policy* **2023**, *25*, 2099–2122. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
72. Pawar, R.; Santara, S.; Sircar, A.; Yadav, K. Design and Development of Hybrid Solar–Biomass Drying System: An Innovative Approach. *MRS Energy Sustain.* **2024**, 1–25. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
73. Singh, A.P.; Tiwari, S.; Sinhar, H. Modelling and Analysis of Photovoltaic-Thermal-Thermoelectric-Cooler Air Collector Integrated Mixed-Mode Greenhouse Dryer with Heat Storage Material. *J. Energy Storage* **2024**, *95*, 112369. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
74. Salvatierra-Rojas, A.; Ramaj, I.; Romuli, S.; Mueller, J. CFD-Simulink Modeling of the Inflatable Solar Dryer for Drying Paddy Rice. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 3118. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
75. Swami, V.M.; Autee, A.T.; Anil, T.R. Experimental Analysis of Solar Fish Dryer Using Phase Change Material. *J. Energy Storage* **2018**, *20*, 310–315. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
76. Mamulkar, C.A.; Ikhar, S. An Investigation of Performance of the Solar Dryer from Several Perspectives. *Int. J. Renew. Energy Res.* **2022**, *12*, 1736–1741. [\[Google Scholar\]](#)
77. Madhankumar, S.; Viswanathan, K.; Wu, W.; Taipabu, M.I. Analysis of Indirect Solar Dryer with PCM Energy Storage Material: Energy, Economic, Drying and Optimization. *Sol. Energy* **2023**, *249*, 667–683. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
78. Jain, A.; Kumar, A.; Shukla, A.; Sharma, A. Development of Phase Change Materials (PCMs) for Solar Drying Systems. *Sol. Dry. Technol. Concept Des. Testing Model. Econ. Environ.* **2017**, 619–633. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
79. Harikrishnan, M.; Kumar, R.A.; Baby, R.; Kumar, S.A. An Experimental Investigation to Assess the Thermal Performance of a Sensible Storage Based-Downward Solar Air Heater. *Exp. Heat Transf.* **2024**, 1–25. [\[Google Scholar\]](#) [\[CrossRef\]](#)
80. Singh, S.; Gill, R.S.; Hans, V.S.; Singh, M. Un nou uscător solar indirect în mod activ pentru produse agricole: evaluare experimentală și fezabilitate economică. *Energie* **2021**, *222*, 119956. [\[Google Academic\]](#) [\[Ref încrucișat\]](#)

81. Kesavan, S.; Arjunan, T.V. Studiu experimental asupra încălzitorului solar de aer cu trei treceri cu stocare a energiei termice pentru uscarea frunzelor de mentă. *Int. J. Energy Technol. Policy* **2018**, *14*, 34–48. [Google Academic] [Ref încrucișat]
82. GaneshKumar, P.; Sundaram, P.; Sathishkumar, A.; Vigneswaran, V.S.; Chopra, T.; Thakur, U.; Kim, S.C.; Ramkumar, V. Explorarea performanței unui uscător solar indirect prin combinarea a trei abordări de augmentare (absorbant trapezoidal, sablare și piatră pietricică). *J. Stocarea energiei* **2024**, *78*, 110109. [Google Academic] [Ref încrucișat]
83. Yadav, S.; Chandramohan, V.P. Analiza numerică a dispozitivului de stocare a energiei termice cu tub de cupru cu aripioare pentru un sistem de uscare solară de tip indirect. *J. Sol. Energie Eng.* **2018**, *140*, 31009. [Google Academic] [Ref încrucișat]
84. Droguy, Y.N.; Koffi, P.E.; Sissoko, A.; Andji, J.; Soro, Y.; Gbaha, P. Simularea CFD a uscătorului solar cu dublă trecere cu retur de aer. *J. Phys. Conf. Ser.* **2024**, *2701*, 12076. [Google Academic] [Ref încrucișat]
85. Behera, D.D.; Mohanty, R.C.; Mohanty, AM Performanța termică a unui uscător solar hibrid prin investigații experimentale și CFD. *J. Proces alimentar Eng.* **2023**, *46*, e14386. [Google Academic] [Ref încrucișat]
86. Ahmadi, M.; Samimi-Akhijahani, H.; Salami, P. Analiza cinetică termo-economică și de uscare a Oleaster folosind un uscător solar integrat cu materiale cu schimbare de fază și sistem de recirculare. *J. Stocarea energiei* **2023**, *68*, 107351. [Google Academic] [Ref încrucișat]
87. Rocha, G.A.O.; Medina, A.N.C.; Arias, L.G.; Caíta, J.F.A.; Villagran, E. Análisis Sobre La Actividad Científica Referente a Las Estrategias de Climatización Pasiva Usada En Invernaderos: Parte 1: Análisis Bibliométrico. *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.* **2022**, *6*, 4596–4623. [Google Scholar]
88. Ejaz, H.; Zeeshan, H.M.; Ahmad, F.; Bukhari, S.N.A.; Anwar, N.; Alanazi, A.; Sadiq, A.; Junaid, K.; Atif, M.; Abosalif, K.O.A. Analiza bibliometrică a publicațiilor despre varianta Omicron din 2020 până în 2022 în baza de date Scopus folosind R și VOSviewer. *Int. J. Environ. Res. Sănătate publică* **2022**, *19*, 12407. [Google Academic] [Ref încrucișat]
89. Madsen, D.Ø.; Berg, T.; Di Nardo, M. Tendințe bibliometrice în cercetarea industriei 5.0: o prezentare generală actualizată. *Appl. Syst. Innov.* **2023**, *6*, 63. [Google Academic] [Ref încrucișat]

90. Agrawal, A.; Sarviya, R.M. O revizuire a lucrărilor de cercetare și dezvoltare privind uscătoarele solare cu stocare a căldurii. *Int. J. Susținere. Energie* **2016**, *35*, 583–605. [Google Academic] [Ref încrucișat]
91. Verma, P.; Singal, S.K. Revizuirea modelării matematice a sistemelor de stocare a energiei termice cu căldură latentă folosind material cu schimbare de fază. *Reînnoi. Susține. Energie Rev.* **2008**, *12*, 999–1031. [Google Academic] [Ref încrucișat]
92. Abi Mathew, A.; Thangavel, V. A Novel Thermal Energy Storage Integrated Evacuated Tube Heat Pipe Solar Dryer for Agricultural Products: Performance and Economic Evaluation. *Renew. Energy* **2021**, *179*, 1674–1693. [Google Scholar] [CrossRef]
93. Venkateswarlu, K.; Reddy, S.V.K. Recent Trends on Energy-Efficient Solar Dryers for Food and Agricultural Products Drying: A Review. *Waste Dispos. Sustain. Energy* **2024**, *6*, 335–353. [Google Scholar] [CrossRef]
94. Sethi, V.P.; Sharma, S.K. Sondaj și evaluare a tehnologiilor de încălzire pentru aplicații agricole de sere la nivel mondial. *Sol. Energie* **2008**, *82*, 832–859. [Google Academic] [Ref încrucișat]
95. Yadav, S.; Lingayat, A.B.; Chandramohan, V.P.; Raju, V.R.K. Analiza numerică a dispozitivului de stocare a energiei termice pentru a îmbunătăți timpul de uscare al uscătorului solar de tip indirect. *Masa de căldură Transf.* **2018**, *54*, 3631–3646. [Google Academic] [Ref încrucișat]
96. Radhakrishnan, G.G.; Sattanathan, M.; Radhakrishnan, R.K.G.; Jeevan, AK Uscător solar pe bază de material cu schimbare de fază: o investigație experimentală pentru uscarea pulpei de mango. *Sol. Energie* **2024**, *277*, 112716. [Google Academic] [Ref încrucișat]
97. Villagran, E.; Ramirez, R.; Rodriguez, A.; Pacheco, R.L.; Jaramillo, J. Simularea comportamentului termic și aerodinamic al unei case de ecran stabilite în condiții de climă tropicală caldă: o abordare numerică. *Int. J. Sustain. Dev. Plan.* **2020**, *15*, 487–499. [Google Academic]
98. Aguilar-Rodríguez, C.E.; Flores-Velázquez, J.; Villagrán, E.; Ramos-Banderas, J.-Á.; Hernández-Bocanegra, C.-A.; Pérez-Inocencio, J. Impactul înălțimii culturii asupra gradientului termic într-o seră încălzită: o analiză numerică. *DYNA* **2024**, *99*, 1–7. [Google Academic]
99. Villagrán, E.A.; Baeza Romero, E.J.; Bojacá, C.R. Analiza CFD tranzitorie a ventilației naturale a trei tipuri de sere utilizate pentru producția agricolă într-un climat tropical montan. *Biosyst. Ing.* **2019**, *188*, 288–304. [Google Academic]