

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Милић Д. Ерић

ПРОЦЕСИ СУШЕЊА ЛИГНИТА СА ВЕЛИКИМ  
САДРЖАЈЕМ ВЛАГЕ У НЕПОКРЕТНОМ И  
ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ

докторска дисертација

Београд, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Milić D. Erić

DRYING PROCESSES OF LIGNITES WITH HIGH  
MOISTURE CONTENT IN PACKED AND  
FLUIDIZED BED

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016.

---

## **Подаци о ментору и члановима комисије**

Ментор:

Проф. др Милош Бањац, Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије:

Проф. др Мирко Коматина, Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Милан Гојак, ванредни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Предраг Стефановић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке "Винча"

Др Стеван Немода, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке "Винча"

Датум одбране:

---

*Посвећујем најмилијима,  
мојој породици*

---

## ***Предговор и захвалност***

*Идеја за израду дисертације је настала у Институту за нуклеарне науке "Винча", Лабораторији за термотехнику и енергетику. Овај рад је мала надградња на богато научно искуство у областима конвективног сушења, енергетске ефикасности и заштите животне средине које је стварано дуги низ година у матичној установи, у којој су обављена експериментална истраживања и развој математичког модела.*

*Докторска дисертација је урађена у оквиру научног пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја: ТР-33050 "Побољшање квалитета и технологије сагоревања домаћих лигнита у циљу повећања енергетске ефикасности и смањења емисије штетних материја из термоелектрана ЈП Електропривреда Србије".*

*Захваљујем се ментору др Милошу Бањцу, редовном професору Машинског факултета у Београду, за велику помоћ да теза добије коначни облик.*

*Посебну захвалност за свесрдну и несебичну помоћ у осмишљавању и изради тезе дугујем свом руководиоцу пројекта др Милану Стакићу, научном саветнику Института за нуклеарне науке "Винча".*

*Такође, захваљујем се и осталим члановима комисије: др Милану Гојаку, ванредном професору Машинског факултета у Београду, др Предрагу Стефановићу и др Стевану Немоди, научним саветницима Института за нуклеарне науке "Винча" на саветима и сугестијама који су ми помогли да завршим тезу.*

*На крају желим да се захвалим својој породици на безрезервној подршци да урадим тезу. Њима посвећујем овај рад.*

*септембра 2016.*

*Милић Ерић*

**Наслов:**

ПРОЦЕСИ СУШЕЊА ЛИГНИТА СА ВЕЛИКИМ САДРЖАЈЕМ ВЛАГЕ У НЕПОКРЕТНОМ И ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ

**Сажетак**

Уклањање влаге из нискоквалитетних угљева се сматра важним поступком побољшања квалитета угља. У раду је приказан преглед тренутног стања технологија оплемењивања нискоквалитетних угљева, са посебним нагласком на процесе сушења као и одстрањивања влаге (у течном стању).

Да би се израчунали значајни параметри процеса уклањања влаге развијен је и представљен модел конвективног сушења угља у флуидизованом слоју, заснован на двофазном моделу мехурастог флуидизованог слоја са гасом и честицама у суспензионој фази и гасом у мехурастој фази. Основна концепција развијеног модела је да се процес сушења у суспензионој фази разматра као за непокретни слој честица, коришћењем концепта "коефицијент сушења", при чему се врши прорачун за елементарне слојеве (запремине) и уопштава за цео слој честица. Мешање честица које се јавља у флуидизованом слоју урачунава се преко дифузионог члана у диференцијалним једначинама. Топлотна проводљивост непокретног слоја коју су дефинисали Zehner, Bauer и Schlünder је коришћена за дефинисање механизма преноса топлоте који се јављају у суспензионој фази флуидизованог слоја. Дискретизација система диференцијалних једначина извршена је нумеричком методом контролних запремина. Добијени систем линеаризованих алгебарских једначина је решаван помоћу ТДМА алгоритма (Три-Дијагонални Матрични Алгоритам).

Релације зависне од материјала (пренос супстанције унутар чврсте фазе, равнотежно стање влаге између гасне и чврсте фазе), које се односе на одговарајућу врсту угља (лигнит Колубара), добијене су претходним истраживањима.

Извршене су две серије експеримента у флуидизованом слоју и једна серија у непокретном слоју. Добијен је потпуно нови сет експерименталних резултата који је успешно искоришћен за валидацију модела.

Поређењем резултата добијених нумеричком симулацијом и експериментом, као и резултата других аутора из доступне литературе, установљено је добро слагање.

Утицај величине честица на кинетику сушења испитиваних малих фракција лигнита Колубара није јасно изражен. Повећањем температуре и улазне брзине ваздуха процес сушења лигнита се значајно убрзава, што је у случају сушења у флуидизованом слоју највише изражено.

Овим приступом истраживања је могуће, извођењем једноставних експеримената процеса сушења у непокретном слоју, прорачунавати процесе сушења у флуидизованом слоју.

**Кључне речи:** нискоквалитетни угљеви, лигнит, процеси уклањања влаге, конвективно сушење, флуидизовани слој, непокретни слој, коефицијент сушења, коефицијенти дифузије.

**Научна област:** Техничке науке

**Ужа научна област:** Машинство

**УДК број:** 66.047.41:622.322:[622.794(043.3)]

**Title:**

DRYING PROCESSES OF LIGNITES WITH HIGH MOISTURE CONTENT IN  
PACKED AND FLUIDIZED BED

**Abstract**

Removal of moisture from low-rank coals is deemed an important quality upgrading method. An overview of the current status of low-rank coal upgrading technologies is presented in the paper, particularly with respect to drying and dewatering procedures.

In order to calculate the significant parameters of the moisture removal process, a model of convective coal drying in a fluid bed, based on the two-phase bubbling fluidization model with gas and particles in suspension phase and gas in bubbling phase, is developed and presented. Basic assumption of the model is that the drying process in suspension phase is considered as for packed bed of particles by applying concept "drying coefficient", where the calculation is performed for elementary layers (volumes) and generalized for the entire bed of particles. The mixing of particles is calculated by means of diffusion term in the differential equations. Effective thermal conductivity of the packed bed as defined by Zehner/Bauer/Schlünder is used to define heat transfer mechanisms occurring in the suspension phase of the fluid bed. A control volume numerical method is used for discretization of the differential equations. Discretization equations have been solved by means of TriDiagonal-Matrix Algorithm.

Product-specific data (intraparticle substance transfer, gas-solid moisture equilibrium) related to the particular coal variety addressed here (Kolubara lignite) are obtained through preliminary investigations.

Two series of experiments in fluidized bed and one series in packed bed were performed. A completely new set of experimental results obtained has been successfully used to validate the model additionally.

Comparison of obtained numerical simulation results and experimental results and results of other authors from available literature have shown a good agreement.



The influence of particle size on the drying kinetics of investigated small fraction of Kolubara lignite is not clearly expressed. With the increase of temperature and inlet air velocity drying process of lignite is considerably faster, which is highly pronounced in the case of drying in a fluidized bed.

With this approach of research is possible, on the basis of simple experiments of drying processes in a packed bed, to calculate the drying processes in a fluidized bed.

**Key words:** low-rank coal, lignite, moisture removal process, convective drying, fluid bed, packed bed, drying coefficient, diffusion coefficients

**Scientific field:** Technical Sciences

**Specific scientific field:** Mechanical Engineering

**UDC number:** 66.047.41:622.322:[622.794(043.3)]

**Садржај**

Сажетак .....	IV
Abstract .....	VI
1. УВОД .....	1
1.1 Увод у тему .....	1
1.2 Преглед стања нискоквалитетних угљева у свету .....	3
1.3 Циљ израде докторске дисертације .....	5
2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ .....	12
3. ФИЗИЧКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА УГЉА .....	26
3.1 Типови везе влаге у угљу .....	26
3.2 Поступци уклањања влаге из угља .....	27
3.3 Конвективно сушење .....	29
3.4 Основна поставка модела преноса топлоте и супстанције у процесу конвективног сушења .....	34
4. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА УГЉА .....	36
4.1 Математички модел сушења у непокретном слоју .....	36
4.2 Математички модел сушења у флуидизованом слоју .....	37
4.3 Изворни чланови .....	41
4.4 Дефинисање параметара .....	43
4.5 Транспортне карактеристике .....	45
4.5.1 Топлотна проводљивост кроз непокретни слој .....	45
4.5.2 Преовлађујући механизам преноса топлоте .....	46
4.6 Нумеричко решавање диференцијалних једначина .....	47
4.7 Алгоритам прорачуна и програм .....	54

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ПРОЦЕСА СУШЕЊА УГЉА .....	57
5.1 Опис експерименталне инсталације .....	57
5.2 Мерење протока ваздуха и одређивање брзине ваздуха .....	60
5.3 Припрема узорка угља за процес сушења .....	64
5.4 Опис извођења експеримента .....	65
5.5 Одређивање минималне брзине флуидизације .....	69
5.6 Израчунавање апсолутне влажности материјала током процеса сушења .....	70
5.7 Израчунавање брзине струјања ваздуха непосредно испред узорка материјала .....	73
5.8 Мерна несигурност измерених параметара .....	74
5.9 Резултати експерименталних испитивања .....	75
6. ВАЛИДАЦИЈА МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА .....	86
6.1 Валидација математичког модела у непокретном слоју .....	86
6.2 Валидација математичког модела у флуидизованом слоју .....	88
7. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И УТИЦАЈА ПОЈЕДИНИХ ПАРАМЕТАРА НА ПРОЦЕС СУШЕЊА .....	91
7.1 Анализа резултата развијеног математичког модела и извршених експерименталних испитивања .....	91
7.2 Утицај величине честица угља и температуре предгревања ваздуха на брзину сушења узорка .....	94
7.3 Утицај промене протока ваздуха на брзину сушења узорка .....	96
8. ЗАКЉУЧАК .....	99
ЛИТЕРАТУРА .....	104

**Списак ознака**

$a$	– експонент у једначини (4.27), [-]
$a_b$	– специфична површина слоја, [ $m^2/m^3$ ]
$a_f$	– коефицијент у једначини (5.11), [-]
$a_L$	– коефицијент у дискретизационој једначини, [-]
$a_p$	– коефицијент у дискретизационој једначини, [-]
$a_p^0$	– коефицијент у дискретизационој једначини, [-]
$a_U$	– коефицијент у дискретизационој једначини, [-]
$a_{ur}$	– коефицијент подрелаксације, [-]
$A$	– слободни пресек, [ $m^2$ ]
$A_0$	– попречни пресек отвора (карактеристика дистрибутора протока), [ $m^2$ ]
$A_1$	– аксијални пренос топлоте дефинисан једначином (4.35), [-]
$A_2$	– пренос топлоте између гаса и честица дефинисан једначином (4.39), [-]
$A_3$	– пренос топлоте кроз честицу дефинисан једначином (4.43), [-]
$A_K$	– коефицијент са димензијама дефинисаним једначином (4.28),
$A_L$	– доња гранична површина контролне запремине, [ $m^2$ ]
$A_U$	– горња гранична површина контролне запремине, [ $m^2$ ]
$b$	– експонент у једначини (4.27), [-]
$b_f$	– коефицијент у једначини (5.11),
$b_p$	– коефицијент у дискретизационој једначини, [-]
$B_0$	– коефицијент са димензијама дефинисаним једначином (4.27),
$c_B$	– специфични топлот. капацитет влажног гаса у мехурастој фази, [ $kJ/(kgK)$ ]
$c_E$	– спец. топлотни капацитет влажног гаса у суспензионој фази, [ $kJ/(kgK)$ ]
$c_{G,B,d}$	– специфични топлотни капацитет сувог гаса у мехурастој фази, [ $kJ/(kgK)$ ]
$c_{G,E,d}$	– специфич. топлотни капацитет сувог гаса у суспензионој фази, [ $kJ/(kgK)$ ]
$c_{m,L}$	– специфични топлотни капацитет воде, [ $kJ/(kgK)$ ]
$c_{m,V}$	– специфични топлотни капацитет паре, [ $kJ/(kgK)$ ]
$c_S$	– специфични топлотни капацитет влажног материјала, [ $kJ/(kgK)$ ]
$c_{S,d}$	– специфични топлотни капацитет сувог материјала, [ $kJ/(kgK)$ ]
$C$	– коефицијент истицања, [-]

- $d_B$  – пречник мехура, [m]
- $d_{op}$  – пречник отвора бленде, [mm]
- $d_S$  – средњи пречник честице, [m, mm]
- $D_{eff}$  – ефективни коефицијент дисперзије честица (дифузије), [m<sup>2</sup>/s]
- $D_L$  – коефицијент дифузије на доњој граници контролне површине, [m<sup>2</sup>/s]
- $D_{op}$  – унутрашњи пречник цеви испред и иза мерне бленде, [mm]
- $D_U$  – коефицијенти дифузије на горњој граници контролне површине, [m<sup>2</sup>/s]
- $D_{eff}$  – ефективни коефицијент дисперзије честица (дифузије), [m<sup>2</sup>/s]
- DTM – доња топлотна моћ угља, [kJ/kg]
- $e$  – основа природног логаритма 2,718, [-]
- $E$  – фактор утицаја узводне брзине, [-]
- $f_B$  – удео мехурасте фазе гаса у односу на укупну запремину гаса, [-]
- $g$  – убрзање земљине теже, [m/s<sup>2</sup>]
- $h$  – висина слоја, [m]
- $(H_{BC})_B$  – запремински коефицијент преноса топлоте између мехура и облака мехура сведен на запремину мехурасте фазе, [W/(m<sup>3</sup>K)]
- $(H_{BE})_B$  – укупни запремински коефицијент преноса топлоте између мехурасте и суспензионе фазе сведен на запремину мехурасте фазе, [W/(m<sup>3</sup>K)]
- $(H_{CE})_B$  – запремински коефицијент преноса топлоте између облака мехура и суспензионе фазе сведен на запремину мехурасте фазе, [W/(m<sup>3</sup>K)]
- $I_{1B}$  – енталпија гаса на уласку у слој материјала у мехурастој фази, [J]
- $I_{1E}$  – енталпија гаса на уласку у слој материјала у суспензионој фази, [J]
- $I_{1S}$  – енталпија честица на уласку у слој материјала у суспензионој фази, [J]
- $J_L$  – укупан флуks опште променљиве кроз доњу границу контролне површине
- $J_N$  – укупан флуks опште променљиве кроз горњу границу контролне површине
- $J_\Phi$  – укупан флуks опште променљиве,
- $(K_{BC})_B$  – коефицијент размене гаса између мехура и облака мехура сведен на запремину мехурасте фазе, [1/s]
- $(K_{BE})_B$  – укупни коефицијент размене гаса између мехурасте и суспензионе фазе сведен на запремину мехурасте фазе, [1/s]
- $(K_{CE})_B$  – коефицијент размене гаса између облака мехура и суспензионе фазе сведен на запремину мехурасте фазе, [1/s]

- $k_i$  – коефицијент унутрашњег преноса влаге кроз материјал ("коефицијент сушења"), [m/s]
- $m_G$  – маса гаса (ваздуха), [kg]
- $m_{G,B,d}$  – маса сувог гаса који протиче кроз мехурасту фазу, [kg]
- $m_{Gd}$  – маса сувог ваздуха, [kg]
- $m_{Gd,hp}$  – маса сувог ваздуха код сонде за влагу током експеримента, [kg]
- $m_{Gd,op}$  – маса сувог ваздуха код мерне бленде током експеримента, [kg]
- $m_{G,E,d}$  – маса сувог гаса који протиче кроз суспензиону фазу, [kg]
- $m_{Gw,hp}$  – маса влажног ваздуха код сонде за влагу током експеримента, [kg]
- $m_{Gw,op}$  – маса влажног ваздуха код мерне бленде током експеримента, [kg]
- $m_{w,hp}$  – маса воде у ваздуху код сонде за влагу током експеримента, [kg]
- $m_{w,op}$  – маса воде у ваздуху код мерне бленде током експеримента, [kg]
- $m_{S,0}$  – маса узорка на почетку сушења, [kg]
- $m_{S,0,i}$  – маса узорка пре почетка сушења у експерименту број  $i$ , [kg]
- $m_{S,d}$  – маса сувог узорка, [kg]
- $m_{S,end}$  – маса узорка на крају сушења, [kg]
- $m_{W,S}$  – маса воде у узорци, [kg]
- $\Delta m_W$  – маса воде издвојена из узорка одређена на основу масеног биланса, [kg]
- $\Delta m_{W,S}$  – маса воде издвојена из узорка добијена мерењем на ваги, [kg]
- $\tilde{m}_V$  – моларна маса водене паре, [kg/kmol]
- $\tilde{m}_G$  – моларна маса гаса, [kg/kmol]
- $\dot{m}_B$  – масени проток гаса који протиче кроз мехурасту фазу, [kg/s]
- $\dot{m}_E$  – масени проток гаса који протиче кроз суспензиону фазу, [kg/s]
- $\dot{m}_G$  – масени проток гаса, [kg/s]
- $\dot{m}_{hp}$  – масени проток ваздуха код сонде за влагу, [kg/s]
- $\dot{m}_{in}$  – масени проток ваздуха непосредно испред слоја, [kg/s]
- $\dot{m}_L$  – масени проток гаса кроз доњу границу контролне површине, [kg/s]
- $\dot{m}_m$  – масени проток испарене влаге, [kg/s]
- $\dot{m}_{op}$  – масени проток ваздуха кроз мерну бленду, [kg/s]
- $\dot{m}_U$  – масени проток гаса кроз горњу границу контролне површине, [kg/s]
- $n_D$  – експонент у једначини (4.28), [-]
- $n_T$  – експонент у једначини (4.28), [-]

- $Pe_S$  – Peclet–ов критеријум, [-]  
 $p_{bar}$  – барометарски притисак ваздуха, [Pa]  
 $p_G$  – притисак ваздуха, [Pa]  
 $p_{G,hp}$  – притисак ваздуха код сонде за влагу, [Pa]  
 $p_{G,in}$  – притисак ваздуха испред узорка, [Pa]  
 $p_{G,op}$  – притисак ваздуха код мерне бленде, [Pa]  
 $p_{G,st,op}$  – статички притисак ваздуха код мерне бленде, [Pa]  
 $p_{p, hp}$  – парциј. притисак водене паре у влажном ваздуху код сонде за влагу, [Pa]  
 $p_{p,in}$  – парцијални притисак водене паре у влажном ваздуху испред узорка, [Pa]  
 $p_{p,op}$  – парциј. притисак водене паре у влажном ваздуху код мерне бленде, [Pa]  
 $p_{ps,hp}$  – притисак сувозасићене водене паре код сонде за влагу, [Pa]  
 $p_{ps,in}$  – притисак сувозасићене водене паре испред узорка, [Pa]  
 $p_{ps,op}$  – притисак сувозасићене водене паре на истој температури код мерне бленде, [Pa]  
 $\Delta p_{G,op}$  – пад притиска ваздуха кроз мерну бленду, [Pa]  
 $P_L$  – Peclet–ов критеријум на доњој граници контролне површине, [-]  
 $P_U$  – Peclet–ов критеријум на горњој граници контролне површине, [-]  
 $r$  – латентна топлота испаравања воде, [J/kg]  
 $R$  – резидуал  
 $Re_d$  – Рејнолдсов број за ваздух кроз грло бленде, [-]  
 $Re_D$  – Рејнолдсов број за узводно стање ваздуха и узводни пречник, [-]  
 $S_C$  – коефицијент, [-]  
 $S_m$  – извор или понор супстанције, [kg]  
 $S_m^P$  – извор или понор супстанције на контролној површини, [kg]  
 $S_p$  – коефицијент, [-]  
 $S_\phi$  – изворни члан опште променљиве, [-]  
 $T_B$  – температура гаса који протиче кроз мехурасту фазу, [°C, K]  
 $T_E$  – температура гаса који протиче кроз суспензиону фазу, [°C, K]  
 $T_G$  – температура гаса (ваздуха), [°C, K]  
 $T_{G,hp}$  – температура ваздуха код сонде за влагу, [°C]  
 $T_{G,in}$  – температура ваздуха испред узорка, [°C, K]  
 $T_{G,in,i}$  – температура ваздуха испред узорка у експерименту број  $i$ , [°C]

$T_{G,op}$	– температура ваздуха испред мерне бленде, [°C]
$T_S$	– температура материјала (честица), [°C, K]
$U$	– укупна проширена мерна несигурност, [-]
$u$	– стандардна мерна несигурност, [-]
$v$	– брзина, [m/s]
$v_G$	– брзина гаса (ваздуха), [m/s]
$v_{G,B}$	– брзина гаса (ваздуха) који протиче кроз мехурасту фазу, [m/s]
$v_{G,E}$	– брзина гаса (ваздуха) који протиче кроз суспензиону фазу, [m/s]
$v_{G,in}$	– брзина ваздуха испред узорка, [m/s]
$v_{G,mf}$	– минимална брзина флуидизације, [m/s]
$v_L$	– брзина на доњој граници контролне површине, [m/s]
$v_S$	– брзина честица материјала, [m/s]
$v_U$	– брзина на горњој граници контролне површине, [m/s]
$V$	– запремина, [m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_{in}$	– запремински проток ваздуха испред слоја, [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{hp}$	– запремински проток ваздуха у излаз. пресеку код сонде за влагу, [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{op}$	– запремински проток ваздуха кроз мерну бленду, [m <sup>3</sup> /s]
$W_0$	– садржај воде у узорку угља на почетку сушења, [%]
$W_{end}$	– садржај воде у узорку угља на крају сушења, [%]
$X$	– апсолутна влажност узорка (садржај влаге у узорку по сувој основи материјала), [kg vode/kg suvog uzorka]
$X_0$	– апс. влажн. узорка на почетку процеса сушења, [kg vode/kg suvog uzorka]
$X_{sf,eq}$	– равнотежни садржај влаге на површини честице, [-]
$Y$	– апсолутна влажност ваздуха (садржај влаге по сувој основи ваздуха), [kg vode / kg suvog vaduha]
$Y_B$	– садрж. влаге (по сувој основи) гаса који протиче кроз мехурасту фазу, [-]
$Y_E$	– садрж. влаге (по сувој основи) гаса који протиче кроз суспенз. фазу, [-]
$Y_{eq}$	– равнотежни садржај влаге у гасу, [-]
$Y_{hp}$	– апсолутна влажност ваздуха код сонде за влагу, [kg vode / kg suv. vaduha]
$Y_{in}$	– апсолутна влажност ваздуха испред слоја, [kg vode / kg suv. vaduha]
$Y_{op}$	– апсолутна влажност ваздуха код мерне бленде, [kg vode / kg suv. vaduha]
$z$	– координата, [-]



### Слова грчког алфабета

- $\alpha$  – коефицијент протока, [-]
- $\alpha_{S,G}$  – коефицијент преноса топлоте између површине честица и гаса, [W/m<sup>2</sup>K]
- $\beta$  – однос пречника  $d_{op} / D_{op}$ , [-]
- $\beta_{S,G}$  – коефицијент преноса супстанције између површине честица и гаса, [m/s]
- $\Gamma_L$  – коефицијент дифузије за општу променљиву на доњој граници контролне површине, [m<sup>2</sup>/s]
- $\Gamma_U$  – коефицијент дифузије за општу променљиву на горњој граници контролне површине, [m<sup>2</sup>/s]
- $\Gamma_\Phi$  – коефицијент дифузије за општу променљиву величину, [m<sup>2</sup>/s]
- $\delta$  – коефицијент дифузије, [m<sup>2</sup>/s]
- $\delta_{eff}$  – ефективни коефицијент дифузије, [m<sup>2</sup>/s]
- $\delta_V$  – коефицијент дифузије паре, [m<sup>2</sup>/s]
- $\varepsilon$  – коефицијент експанзије стишљивог флуида, [-]
- $\kappa$  – коефицијент изентропе, [-]
- $\eta_G$  – коефицијент динамичке вискозности гаса, [Pas]
- $\lambda_{ax}$  – топлотна проводљивост у аксијалном смеру протока гаса
- $\lambda_b$  – ефективна топлотна проводљивост насутог/непокретног слоја, [W/(mK)]
- $\lambda_{eff}$  – ефективна топлотна проводљивост, [W/(mK)]
- $\lambda_F$  – топлотна проводљивост флуида, [W/(mK)]
- $\mu_{Gw,in}$  – кинематска вискозност влажног ваздуха испред узорка, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho$  – густина, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{Gw,hp}$  – густина влажног ваздуха у излазном пресеку код сонде за влагу, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{Gw,in}$  – густина влажног ваздуха испред узорка, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_{Gw,op}$  – густина влажног ваздуха испред мерне бленде, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_L$  – густина на доњој граници контролне површине, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_P$  – густина за контролну површину, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_P^0$  – густина за контролну површину на почет. временског интервала, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_S$  – густина угља (лигнита), [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_U$  – густина на горњој граници контролне површине, [kg/m<sup>3</sup>]
- $\tau$  – време трајања процеса сушења, [min]

- $\phi_S$  – коефицијент сферичности честице, [-]  
 $\Phi$  – општа зависно променљива величина,  
 $\Phi_L$  – вредност опште променљиве на доњој граници контролне површине  
 $\Phi_n$  – вредност опште променљиве добијене током текуће итерације  
 $\Phi_{n-1}$  – вредност опште променљиве добијене током претходне итерације  
 $\Phi_P$  – вредност опште променљиве у контролној површини  
 $\Phi_P^0$  – вредност опште променљиве у контролној површини на почетку  
временског интервала, [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\Phi_U$  – вредност опште променљиве на горњој граници контролне површине  
 $\varphi_{eq}$  – релативна влажност гаса у равнотежном стању, [%]  
 $\varphi_{hp}$  – релативна влажност ваздуха у излазном пресеку код сонде за влагу, [%]  
 $\varphi_{in}$  – релативна влажност ваздуха испред слоја, [%]  
 $\varphi_{op}$  – релативна влажност ваздуха испред мерне бленде, [%]  
 $\psi_{mf}$  – порозност слоја, [-]

#### Бездимензиони критеријуми

- $Ar_S$  – Archimedes-ов критеријум,  $d_S^3 \rho_S (\rho_S - \rho_G) g \eta_G^{-2}$ , [-]  
 $Nu_S$  – Nusselt-ов критеријум,  $\alpha_{S,G} d_S \lambda_G^{-1}$ , [-]  
 $Pr$  – Prandtl-ов критеријум,  $c_G \eta_G \lambda_G^{-1}$ , [-]  
 $Re_S$  – Reynolds-ов критеријум,  $d_S v_G \rho_G \eta_G^{-1}$ , [-]

### 1. УВОД

#### 1.1 Увод у тему

Кјото Протокол усвојен на трећем заседању Конференције чланица конвенције Уједињених нација о промени климе, одржаном децембра 1997. године је конкретизовао обавезе држава чланица у смањењу емисије ГХГ (Greenhouse gases) у наступајућем периоду. Обзиром да емисија угљен-диоксида највише учествује у укупној емисији ГХГ (са око 75%), највећи изазови су у смањењу потрошње фосилних горива, пре свега угља јер он има највећи емисиони фактор, тј. највећу емисију угљен-диоксида по јединици искоришћене енергије. Од свих фосилних горива у свету највеће су резерве угља, које су најравномерније распоређене и њихова масовна експлоатација обезбеђује стабилну и релативно ниску цену на међународном тржишту. Због тога се ни најразвијеније земље света као ни земље у развоју не могу одрећи угља у структури примарних енергената за обезбеђење стабилног снабдевања својих потрошача по приступачним ценама. У том смислу су дефинисани бројни програми за повећање енергетске ефикасности у читавом ланцу од експлоатације и трансформације примарних фосилних горива до финалне потрошње свих облика енергије, за смањење негативних еколошких утицаја експлоатације, трансформације и коришћења енергије фосилних горива и пратеће емисије ГХГ.

Један од програма јесте и смањење емисије угљен-диоксида повећањем енергетске ефикасности у процесу конверзије фосилних горива, пре свега угља у електричну енергију под називом Clean Coal Technologies - чисте технологије конверзије угља, који обухвата читав опсег технологија за конверзију и унапређено сагоревање угља ради смањења пратећег негативног утицаја на животну околину, на коме се највише инвестира и ради у САД, ЕУ, Јапану, Канади и Аустралији.

У оквиру пројеката Clean Coal Technologies, посебна пажња је посвећена нискоквалитетним угљевима са великим садржајем влаге у које спадају и лигнити, а чије су резерве у свету значајне. У том смислу већ више од двадесет година интензивно се ради на повећању енергетске ефикасности конверзије

нискоквалитетних угљева са великим садржајем влаге у електричну енергију у термоблоку развојем и увођењем процеса његовог предсушења топлотном енергијом расположивом на самом термоблоку. Досадашњи остварени резултати и ниво имплементације ове нове технологије на индустријским енергетским термоблоковима на лигнит у Немачкој, дају за право да се њена широка комерцијална примена предвиђа у свим релевантним званичним планским документима Европске Комисије. Увођењем процеса предсушења угља степен корисности термоблока може се значајно повећати (за око 4 процентуална поена на новим блоковима, са око 40% колико имају савремени термоблокови са надкритичним параметрима свеже паре који сагоревају равни лигнит, садржаја влаге ~50% на око 44% за еквивалентни блок али са интегрисаним процесом предсушења истог лигнита).

Сагоревањем лигнита са релативно високим садржајем влаге, велики део енергије се троши на њено одстрањивање (око 2700 kJ/kg воде, односно 1000÷1500 kJ/kg сировог угља, зависно од садржаја влаге у угљу), што представља најзначајнији енергетски губитак у процесу сагоревања. Влага уклоњена из угља у самом процесу сагоревања угља је у стању паре и представља један део укупних гасовитих продуката сагоревања.

Постоје два основна начина за уштеду ове нерационално утрошене енергије:

- предсушење угља (лигнита) коришћењем (рекуперацијом) отпадне топлоте из процеса сагоревања (топлота отпадних гасовитих продуката сагоревања ниских термодинамичких карактеристика) и
- коришћење (регенерација) латентне топлоте испарене влаге из угља у самом процесу сушења.

Основна идеја везана за предсушење угља је да се што је могуће већи део садржаја влаге у угљу уклони пре самог процеса сагоревања угља, а да се енергија потребна за уклањање влаге из угља обезбеди рекуперацијом/регенерацијом расположиве отпадне топлоте. Тиме се повећава топлотна моћ угља на ниво који омогућава сагоревање ових угљева у конвенционалним котловима без коришћења додатног горива за подршку сагоревања и смањује удео водене паре у отпадним димним гасовима, чиме се повећава степен корисности котла и термоблока.

### 1.2 Преглед стања нискоквалитетних угљева у свету

Амерички нискоквалитетни угљеви садрже повећани удео влаге. Типичне вредности садржаја влаге се крећу у опсегу [1]: суб-битуминозни угљеви 15÷30%, а лигнити 25÷40%. Садржај пепела америчких лигнита варира зависно од садржаја влаге, па нпр. садржај пепела лигнита (North Dakota) са 40% влаге износи 12% [1]. Аутор Леви и сарадници [2] су извели експерименте сушења угља у флуидизованом слоју са угљевима следећег садржаја влаге: суб-битуминозни угљ (Power River Basin) око 37% и лигнит (North Dakota) 54÷58%.

Садржај влаге немачких ниско-квалитетних угљева прелази 50%, док је садржај пепела 5÷15%, зависно од садржаја влаге [3]. Експлоатациони басени лигнита тј. меких мрких угљева су: Рајнски, Lusatian, Централно-немачки и Helmstedt.

Грчки лигнити због веома великог садржаја влаге, релативно великог садржаја пепела и ниске топлотне моћи, спадају међу лигните најлошијег квалитета [4]. У већини случајева садржај влаге износи 50÷60%, док је садржај пепела 15÷20%. Веома важна компаративна предност грчких угљева је низак садржај сумпора. Главна експлоатациона налазишта су: Ptolemais, Amyndeon, Florina и Elassona на северу, Drama на североистоку Грчке, и Megalopolis на југу, тј. на Пелопонезу.

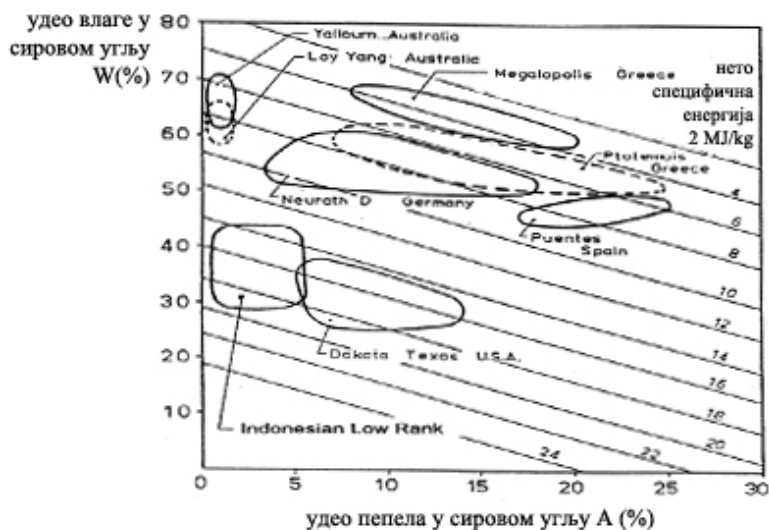
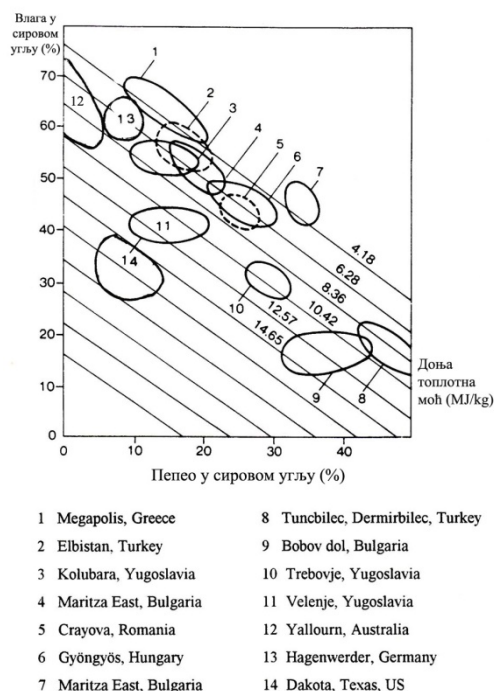
Бугарска има значајне резерве нискоквалитетног угља. Бугарски лигнити садрже [5] у просеку 55% влаге, док удео пепела јако варира уз просечну вредност преко 20%. Највеће резерве лигнита су на локацији Maritza-East (око 2,5 милијарди тона), али је додатна неповољна карактеристика лигнита из овог басена врло висок садржај сумпора. Од годишње производње од око 25 Mt/god преко 80% се потроши у три околне термоелектране за производњу електричне енергије.

Аустралијски нискоквалитетни угљеви (Victorian Brown Coal) поседују релативно велики садржај влаге 47÷80%, уз мали садржај пепела, максимално 4% и сумпора  $\leq 1\%$ . Највећа налазишта су у подручју Latrobe Valley.

По правилу је садржај пепела нискоквалитетних угљева мањи уколико је садржај влаге већи, што се може видети и на слици 1.1. Са слике је нарочито уочљив контраст између угља са подручја Latrobe Valley - Yallourn & Lay Yang

## 1. Увод

(Аустралија), са малим садржајем пепела ( $2\div 3\%$ ) и угља North Dakota (САД) са  $35\div 40\%$  влаге и  $7\div 10\%$  пепела.



Слика 1.1. Упоредни приказ садржаја влаге и пепела нискоквалитетних угљева у свету [6, 7]

Колубарски басен угља има више површинских копова: ПК Тамнава Западно Поље, ПК Тамнава Источно Поље, ПК Радљево, ПК Поље Д, ПК Велики Црљени, ПК Поље Г. Резултати анализа садржаја влаге и пепела, као и доњег топлотног ефекта горива више узорака Колубарског лигнита у доставном стању са различитих копова Колубарског басена [8] приказани су табели 1.1.

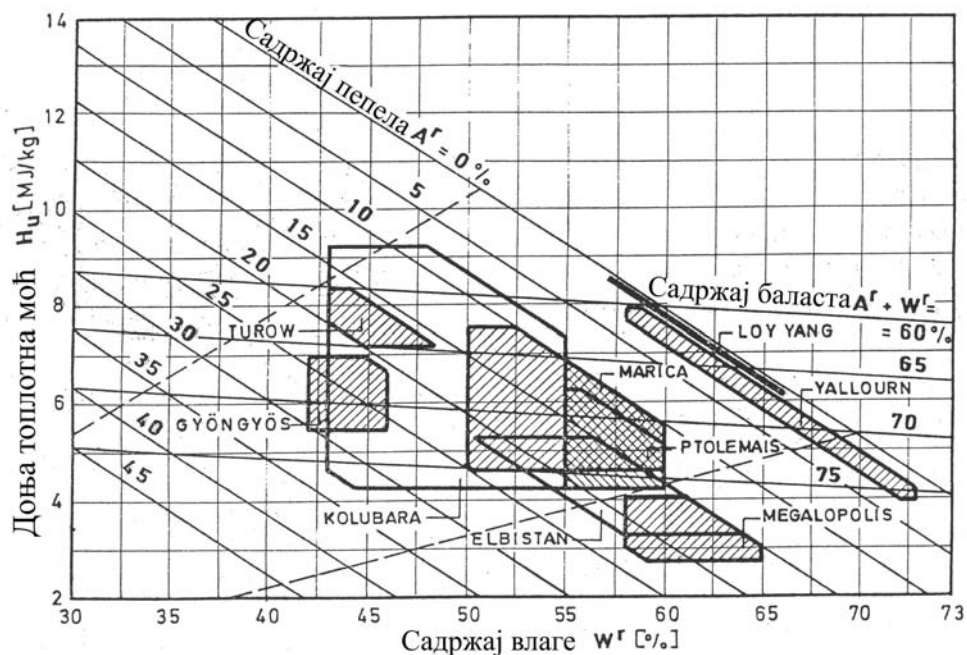
Табела 1.1 Резултати анализа садржаја влаге и пепела и доњег топлотног ефекта горива више узорака Колубарског лигнита у доставном стању [8]

Површински коп	Тамнава – источно поље	Тамнава – западно поље	ПК Поље Д	ПК Радљево
Влага (%)	47,80 – 52,40	49,00 – 50,80	48,80	49,18 – 50,34
Пепео (%)	9,42 - 22,95	14,00 – 16,90	14,05	14,63 - 18,73
ДТЕ* (kJ/kg)	6012 - 8939	7062 - 7511	8143	6800 - 7500

\*ДОЊИ ТОПЛОТНИ ЕФЕКАТ ГОРИВА при константној запремини

На слици 1.2 дате су упоредне карактеристике лигнита из РБ Колубара и нискоквалитетних лигнита из најпознатијих површинских копова у Европи,

Турској и Аустралији, који се спаљују у термоблоковима за производњу електричне енергије. По основним карактеристикама лигнити из наших рудника потпуно одговарају нискоквалитетним европским и аустралијским лигнитима, који се сматрају погодним за процес предсушења.



Слика 1.2 Основне карактеристике лигнита колубарског басена у односу на европске и аустралијске нискоквалитетне лигните [9]

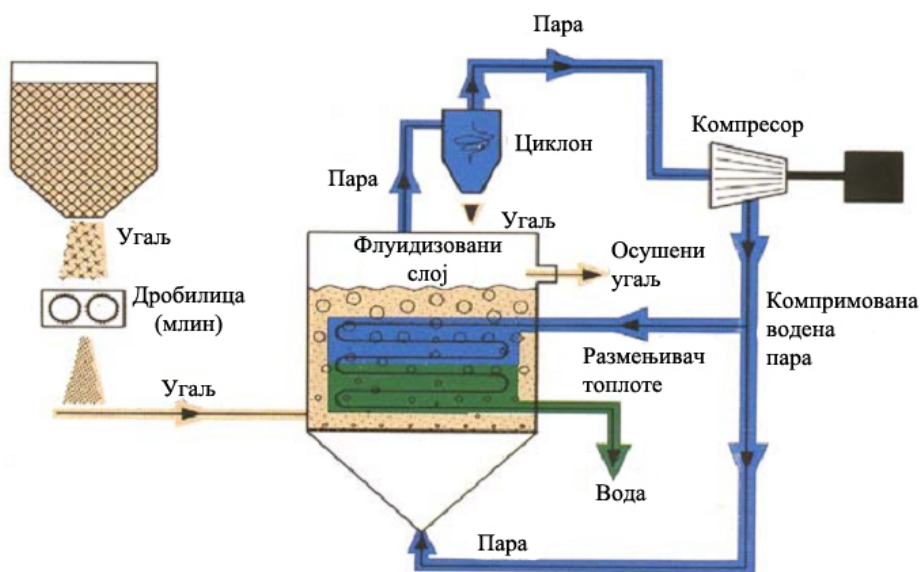
### 1.3 Циљ израде докторске дисертације

Процеси уклањања влаге сушењем из разноврсних материјала у различитим гранама индустрије представљају једну од најраспрострањенијих технолошких операција за шта је потребна значајна количина енергије. Сваки материјал зависно од својих физичко-хемијских особина, облика, садржаја и начина везе влаге, има своје специфичности, па је уобичајено становиште да у данашње време постоји онолико различитих начина сушења материјала, односно типова индустријских сушара, колико има различитих материјала које треба осушити. У том смислу истраживање карактеристика процеса сушења домаћих лигнита, пре свега из колубарског басена, представља основу за правилну, потенцијалну примену процеса предсушења на термоблоковима у Србији.

Сушење у флуидизованом слоју омогућава интензиван контакт гаса потребног за постизање стања флуидизације (загрејан ваздух, димни гасови или водена пара) са честицама материјала који се суши, при чему проток гаса мора бити довољан за остваривање стања флуидизације (савладавање тежине честица и довођење честица у лебдеће стање). Гас потребан за флуидизацију представља уједно и агенс сушења (доводи топлоту потребну за сушење и одводи одстрањену влагу).

У свету је веома развијен процес сушења нискоквалитетних угљева у флуидизованом слоју који подразумева сушење влажног материјала агенсима сушења као што су ваздух, прегрејана водена пара, инертни гасови и гасовити продукти сагоревања.

Концепт сушења воденом паром у флуидизованом слоју DWT (Dampf Wirbelschicht Trocknung) је развијен на Универзитету „Monash”, Аустралија (Monash University of Melbourne) и у „ORGREB” институту (ORGREB Institut für Kraftwerke Vetschau), данас „VPC”, Дрезден, Немачка. У процесу се користи благо прегрејана водена пара за постизање стања флуидизације, а за загревање слоја се користи засићена компримована водена пара притиска 4÷5 бар (коришћење латентне топлоте кондензације водене паре) изузета са парне турбине, која пролази кроз размењивач топлоте уроњен у слој. Део водене паре, која напушта флуидизовани слој, се након пречишћавања враћа у слој за потребе постизања флуидизованог стања, слика 1.3.



Слика 1.3 Сушење воденом паром у ФС [7]



У Немачкој је пуштено неколико постројења који користе технологију предсушења, која се назива WTA поступак (WTA - Wirbelschicht Trocknung mit interner Abwärmenutzung), које се обавља у контактним сушарама са флуидизованим слојем. Стање флуидизације се остварује благо прегрејаном воденом паром, а основне карактеристике овог поступка, како је раније назначено, су следеће:

- сушење прегрејаном воденом паром у флуидизованом слоју са малом променом висине слоја,
- довођење топлоте за сушење размењивачем топлоте уроњеним у слој (контактно),
- коришћење кондензата водене паре за предгревање угља или напојне воде,
- честице осушеног угља величине мање од 2 mm.

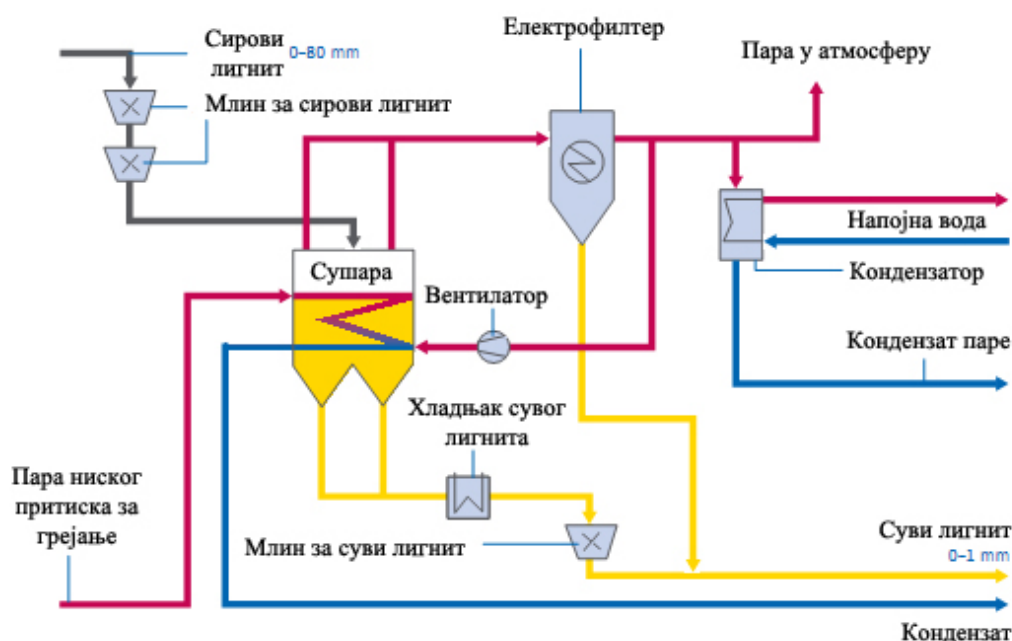
У првој фази развоја WTA процес је пројектован за сушење угља грубе гранулације (0÷6 mm) и тестиран на демонстрационом постројењу (WTA 1) Frechen поред Келна [10]. Током 20.000 часова пробног рада у периоду 1993÷1999. године ово WTA демонстрационо постројење и систем компресије водене паре за загревање материјала у сушари, по први пут у свету примењен за сушење лигнита, показао је сасвим задовољавајуће резултате.

Током тестирања су потврђена претходно наведена теоријска сазнања да смањење величине честица угља пре процеса сушења доводи до повећања интензитета преноса топлоте, а истовремено смањује потребан проток (брзину) флуида којим се остварује стање флуидизације. Ново постројење (WTA 2) Frechen за сушење угља fine гранулације (0÷2 mm) је подигнуто 2000. године. На слици 1.4 је приказан WTA процес сушења угља fine гранулације у коме се латентна топлота кондензације дела водене паре изузете из сушаре након пречишћавања користи за предгревање воде за напајање котла. Остатак водене паре се након изузимања из сушаре и пречишћавања враћа у флуидизовани слој и користи за постизање стања флуидизације.

Основни параметри постројења за сушење угља грубе (WTA 1 – Frechen) и fine (WTA 2 – Frechen) гранулације су дати у Табели 1.2 [10].

Табела 1.2. Параметри постројења за сушење угља грубе и fine гранулације угља

	WTA 1 – груба гранулација	WTA 2 – fina гранулација
Сирови угаљ (улаз) садржај влаге гранулација честица	52 ÷ 61% 0 ÷ 6 mm	51 ÷ 59% 0 ÷ 2 mm
Осушени угаљ (излаз) садржај влаге гранулација честица	10 ÷ 20% 0 ÷ 5 mm	10 ÷ 20% 0 ÷ 1 mm
Брзина флуидизације (сред. вр.)	0,4 m/s	0,14 m/s

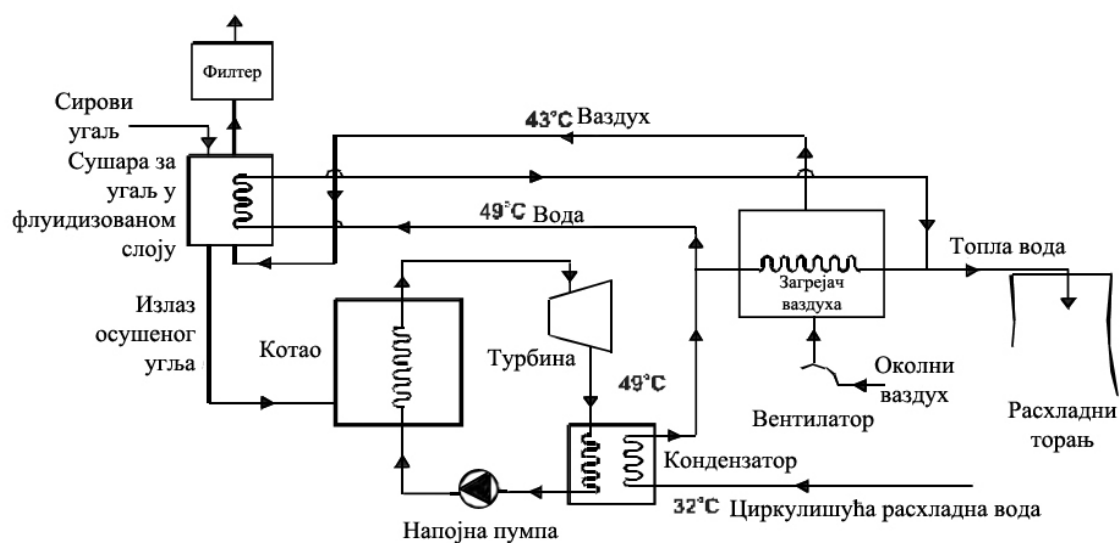


Слика 1.4 WTA процес сушења угља fine гранулације са кондензацијом паре

У САД се од 1997. године кренуло се најпре са теоријским анализама, пробним тестовима и техно-економским анализама тј. припрема за реализацију пројекта, да би 2006. године, у првој фази био изграђен и инсталиран први прототип сушаре са флуидизованим слојем у оквиру термоелектране „Coal Creek Station”, Underwood, North Dakota компаније „Great River Energy (GRE)” [11]. Максималан капацитет постројења је 112,5 t/h сувог угља, при чему се угаљ суши топлим ваздухом са 38,5% на 29,5% влажности (садржај влаге се смањује за четвртину). Ово постројење се показало веома успешним, тако да се у другој фази планира комплетирање (још 3) индустријских постројења потребних за сушење угља на блоку 2, а касније и на блоку 1 ове електране (сваки снаге 576 MW).

Систем од четири сушаре, свака капацитета 135 t/h сировог угља, задовољава комплетне потребе једног блока ове електране.

Током припреме пројекта на бази масених и енергетских биланса за цео термоблок који има расхладни систем са расхладним торњевима одређени су потенцијали отпадне топлоте за процес предсушења угља. Анализа је указала да отпадна енергија водене паре у димном гасу (енергија која би се ослободила кондензацијом) је на нивоу 6,6% а да је топлотни губитак сувог димног гаса на нивоу 7,7% од улазне енергије угља (рачунато на бази горње топлотне моћи). На основу тога, коришћењем отпадне топлоте димног гаса за смањење садржаја влаге за 5 процентуалних поена за целокупну количину угља, процењено снижење температуре димног гаса било  $\sim 17^{\circ}\text{C}$ . Други извор отпадне топлоте јесте водена пара на излазу из турбине која садржи чак 46% од улазне енергије угља (рачунато на бази горње топлотне моћи). При пуној снази блока, само 2% од ове енергије теоријски би било довољно да смање садржај влаге за 5 процентуалних поена за целокупну количину угља. То је при реализацији овог пројекта, усмерило на две могуће шеме процеса [1]. У првој се расхладна вода, која је на излазу из расхладног торња температуре  $32^{\circ}\text{C}$ , а на излазу из кондензатора водене паре на  $49^{\circ}\text{C}$ , користи за загревање ваздуха до  $43^{\circ}\text{C}$ , којим се остварује стање флуидизације у процесу сушења угља у флуидизованом слоју (слика 1.5). Међутим, како је термички капацитет нискотемпературног ваздуха релативно низак то је и капацитет овакве сушаре ограничен. Због тога се већ у почетку реализације прешло на коришћење цевног размењивача топлоте уроњеног у флуидизовани слој угља кроз који пролази део расхладне воде са излаза из кондензатора температуре до  $49^{\circ}\text{C}$ . Тиме се знатно повећава пренос топлоте и капацитет сушаре, односно, смањују њене димензије (у односу на шему без уроњеног размењивача) и инвестициони трошкови за задати капацитет. Међутим, како капацитет сушења битно расте са повишењем температуре флуидизованог слоја, у анализама је разматрана и могућност коришћења отпадне топлоте димног гаса обзиром да је она на много вишем температурном нивоу у односу на расхладну воду на излазу из кондензатора.



Слика 1.5. Шема постројења са загрејачем ваздуха и сушењем угља у флуидизованом слоју (са уроњеним размењивачем у флуидизовани слој).

Основна разлика између постројења за сушење угља у флуидизованом слоју, која су развијана и реализована у Немачкој и САД, је у томе који се гас примењује за постизање стања флуидизације. У САД се користи загрејан ваздух, док се у Немачкој користи прегрејана водена пара.

С обзиром на карактеристике нискоквалитетних угљева у смислу материјала који треба осушити, међу које спадају и наши лигнити са копова Колубара и Костолац, може се закључити следеће:

- релативно мале димензије честица угља (неколико милиметара) захтевају примену сушара са покретним стањем материјала (обртни, флуидизовани и виброфлуидизовани слој) да би се током процеса сушења обезбедио што бољи (равномеран) контакт сваке честице угља, како са агенсом сушења, тако и са површином размењивача топлоте,
- опасност од samozапалења угља током процеса сушења ограничава употребу влажног ваздуха као агенса сушења на релативно ниске улазне температуре ваздуха.

Доња топлотна моћ је линеарно зависна од садржаја воде у узорку угља, тј. процесом сушења се значајно повећава доња топлотна моћ угља. Сушењем до равнотежне равнот угља Колубара са доњом топлотном моћи изнад 5000 kJ/kg може се повећати његова доња топлотна моћ изнад 8000 kJ/kg, тј. добити угаљ који може сагоревати без стабилизације течним горивом у постојећим

термоблоковима. Процесом сушења може се значајно проширити опсег квалитета угља који се може сагорети у постојећим термоблоковима односно повећати експлоатационе резерве лигнита у РБ Колубара, које се данас одбацују као јаловине (према постојећем споразуму између РБ Колубара и ПД ТЕНТ угаљ испод 5234 kJ/kg се не плаћа, јер га је тешко сагорети чак и уз коришћење додатног течног горива).

Могућност „оплемењавања“ угља процесом предсушења је посебно значајна за лигните који ће се експлоатисати у наредном периоду (после 2017.) када ће у колубарском басену основни копови бити Тамнава Западно Поље и нови копови: Радљево и Поље Е [12]. За лигнит из Колубарског басена у периоду од 2013. године до 2040. године предвиђа да ће имати осцилације квалитета уз константан пад вредности доње топлотне моћи до краја експлоатације, нарочито за ПК Тамнава Западно Поље.

Погоршан квалитет лигнита Колубара у термоблоковима ТЕ "Никола Тесла" има вишеструке негативне утицаје на: систем допреме од утоварног места до депоније термоелектране, смањење капацитета млинских постројења уз погоршање финоће млевења, пад топлотног оптерећења котловског ложишта, потребе укључивања горионика течног горива у циљу стабилизације сагоревања, повећања сопствене потрошње електричне енергије укључењем резервних млинских постројења, снижење степена корисности котловског постројења и др.

На основу светских достигнућа у области предсушења нискоквалитетних угљева у флуидизованом слоју и карактеристика наших домаћих лигнита може се уочити оправданост да се таква испитивања изврше у Србији, а њихови резултати примене на домаћим термоенергетским постројењима.

### 2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Истраживања процеса сушења нискоквалитетних угљева у свету могу се сврстати у две врсте испитивања:

- истраживања кинетике и утицајних параметара процеса сушења нискоквалитетних угљева са великим садржајем влаге и
- примена и утицај метода сушења/одстрањивања влаге из нискоквалитетних угљева на повећање ефикасности рада термоенергетских постројења и смањење загађења животне средине.

Јапански научници Yohsuke Matsushita, Hyun-Seok Kim и други извршили су експериментална испитивања процеса сушења у флуидизованом слоју угља Lou Yang, једног од репрезентативних Викторијанских (Victorian) мрких угљева у Аустралији, који у доставном стању има висок садржај влаге (и до 65%) [13-16]. Као агенс сушења користили су ваздух на различитим температурама и брзинама флуидизације од 0,1 – 0,35 m/s.

За истраживања је коришћена апаратура са комором за сушење висине 200 mm, унутрашњим пречником 22 mm и халогеним извором топлоте. Ваздух је убризгаван у слој кроз алуминијумски дистрибутор сачињен од куглица пречника 1 mm. Због ограничења апаратуре аутори су се највише фокусирали на температуру ваздуха као променљиву. Температуру ваздуха су варирали у опсегу 40-80°C, а релативну влажност ваздуха у опсегу 0-40% при различитим брзинама флуидизације.

Ровни угаљ Lou Yang је самлевен на ситније фракције са пречником честица до 2 mm, а затим просејан тако да су коришћене фракције пречника 600-850  $\mu\text{m}$ . У комору су стављани узорци од 2,5 g.

За описивање брзине сушења користили су једноставну једначину,  $dv / dt = -k \cdot (1 - X)^n$ ; па је брзина сушења у функцији константе брзине сушења  $k$ , садржаја влаге материјала  $X$  и експонента  $n$ . На основу експерименталних истраживања на равном угљу Lou Yang одређено је да за вредност експонента  $n$  треба узети 0,25 и да она је независна од температуре ваздуха, релативне влажности ваздуха или брзине флуидизације. Константа брзине сушења  $k$  се може изразити као функција температуре, релативне влажности, брзине флуидизације. У границама

експерименталне грешке,  $k$  је линеарна функција сваке променљиве, а расте са порастом температуре, смањењем релативне влажности ваздуха и повећањем брзине флуидизације.

Опсежне студије су спроведене за одређивање изотерми десорпције Викторијанских мрких угљева, а за Loy Yang угља изотерма десорпције има облик Sigmoid функције [17, 18].

У испитиваном опсегу [13-16], однос између релативне влажности ваздуха и равнотежног садржаја влаге може изразити и као Sigmoid и као линеарна функција, али се Sigmoid функција показала као прецизнија у опсегу експерименталних услова.

У овим експерименталним испитивањима процеса сушења равнотежни садржаји влаге Loy Yang угља са различитим релативним влажностима ваздуха и при различитим температурама су израчунати помоћу модела Dan-a и Nelson-a, који је изведен из Henderson-овог модела за изотерму десорпције пшенице, који даје веома тачан математички израз изотерме десорпције [19]. Недавно је истражено и потврђено да се овај модел може користити да опише изотерму десорпције мрког угља за широки опсег температура и влажности [20].

За истраживање кинетике сушења, развијено је више различитих модела процеса сушења у флуидизованом слоју. Модели које су објавили Visvanathan и Chandran и др. занемарују утицај мехурова у слоју [21, 22]. Kannan и др. су развили модел који има двофазни хидродинамички карактер. Међутим, они занемарују утицај промене температуре честица са временом боравка и променом садржаја влаге у слоју, који су укључили Chen и др. [23]. Chen и др. су развили модел сушења паром у флуидизованом слоју, који је био наставак ранијег модела са једном порозном честицом. Они су у модел увели температуру инверзије, изнад које је брзина испаравања у пари већа него у ваздуху. Њихови резултати су корисни, јер су утврдили да се ова вредност може мењати са брзином испаравања, а брзина сушења веома зависи од радних услова [24].

Ванг је извршио испитивања три различита Illinois угља на лабораторијској апаратури за сушење у флуидизованом слоју на ниској температури ваздуха. Развио је и теоријски модел који користи четири параметра: садржај влаге у угљу, излазну температуру ваздуха, излазну апсолутну влажност ваздуха и излазну

релативну влажност ваздуха, које се одређују на основу једначина одржања енергије и супстанције [25].

Ови резултати су такође корисни, али је направљено неколико претпоставки које могу довести до грешке, нарочито у почетном периоду процеса сушења. Иако су у широкој употреби, по свему судећи, погодни математички модели за пројектовање постројења или оптимизацију рада коришћењем једначина одржања енергија и супстанције имају ограничења због своје сложености, и представљају сталне изазове. Упркос непрецизности, "plug-flow" модел концептуално је једноставан модел који захтева минимални математички прорачун, и даље остаје широко коришћен за практичне инжењерске процесе [26].

Аутори Levy, Caram, Sarunas и др. извршили су лабораторијске експерименте са два угља са изузетно високим садржајем влаге који се сагоревају у термоелектранама у САД: лигнит North Dakota и суббитуминозни угаљ из рударског басена Powder River Basin (PRB), да би утврди кинетику сушења угља у мехурастом флуидизованом слоју. Садржај влаге у испитиваним узорцима је износио 54 – 58% за угаљ North Dakota и око 37% за угаљ Powder River Basin [27].

Експерименти процеса сушења у мехурастом флуидизованом слоју су изведени у сушари висине 1372 mm и пречника 152 mm, са дистрибутивном плочом од синтерованог металног праха. Висина слоја је износила 0,39 m. Електрични грејачи у слоју су коришћени да симулирају цевни измењивач топлоте у слоју, обезбеђујући на тај начин додатну топлотну енергију за сушење.

Као агенс сушења коришћен је ваздух, који је загреван (као и загрејач уроњен у слој) у опсегу температура до 66°C и са брзинама од 0,9 до 1,7 m/s. Експерименталним резултатима је одређен утицај брзине ваздуха, температуре сушења и улазне влажности ваздух на брзину сушења.

Такође, развили су једноставан математички модел сушења угља заснован на експериментално одређеној равнотежи садржаја влаге у угљу и релативне влажности ваздуха и једначинама одржања енергије и супстанције. Модел претпоставља да су у сваком временском тренутку ваздух и честице у слоју на истој температури и да се особине гаса и честица не мењају са порастом висине од улазне равни слоја, односно модел не укључује информације о понашању



мехурова у слоју, о интеракцији гаса и честица, ни кретању влаге унутар честица. На тај начин слој је разматран као насути/непокретни слој. Коришћен је систем од четири диференцијалне једначине одржања енергије и супстанције помоћу којих су израчунати садржај влаге у угљу и температура слоја као функција времена, апсолутна влажност као функција релативне влажности и температуре ваздуха, а топлота доведена уроњеним загрејачем у функцији температура цевног загрејача и температура слоја. Овај систем је решен је нумеричком интеграционом шемом Runge Kutta.

Добили су добро слагање резултата добијених моделом са експерименталним подацима и тиме показали да за ову примену, брзина сушења не зависи од понашања мехурова у флуидизованом слоју, ни од интеракције гаса и честица, ни од кретања влаге унутар честица, већ од протока, садржаја влаге и температуре ваздуха и равнотежног садржаја влаге угља, али у контролисаним условима преноса топлоте који су остварени помоћу цевног измењивача уроњеног у слој.

Научници Levy и Sarunas били су укључени у рад са енергетском корпорацијом Great River Energy Corporation на студији нискотемпературног сушења у термоелектрани Coal Creek Generating Station у Underwood-у, Северна Дакота. Термоелектрана Coal Creek има два блока укупне бруто производње веће од 1100 MW. У ложиштима ових блокова сагорева се лигнит који садржи око 40% влаге и 12% пепела.

Пројектни тим је извео теоријску анализу да процени утицај просеца сушења угља на расхладни систем воде, у коме се загрејана вода, која циркулише од кондензатора ка расхладном торњу, користи за загревање ваздуха за сушење и могућност смањења специфичне потрошње блока која би се могла постићи на термоелектрани Coal Creek Generating Station уклањањем дела влаге горива. Резултати показују да ће сушењем лигнита од 40% до 25% влаге доћи до смањења потрошње расхладне воде од 5% до 7%, у зависности од атмосферских услова. Анализа такође показује да ће потрошња специфичне топлоте блока, као и емисије CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> бити смањени за око 5% [28].

Испитивање сагоревања осушеног лигнита је спроведено на блоку 2 термоелектране Coal Creek Station 2001. године и утврђени су утицаји на оперативни рад постројења. За ова испитивања лигнит је осушен системом за

сушење залиха угља на отвореном простору. У просеку, садржај воде угља је смањен за 6,1% (са 37,5% на 31,4%). Анализа степена корисности котла и специфичне потрошња блока показују да је сушењем угља побољшање степена корисности котла око 2,6%, а смањење нето специфичне потрошње блока је 2,7% до 2,8%. Ови резултати су у сагласности са теоријским предвиђањима. Експериментални подаци такође показују да је потрошња горива смањена за 10,8%, а проток димног гаса је смањен за 4%. Комбинацијом смањене потрошње угља и боље мељивости млина снижава се потрошња електричне енергије млина за око 17%. Снага вентилатора је смањена за 3,8% због мањих протока димних гасова и ваздуха. Просечно смањење сопствене потрошње је било око 3,8% [28].

Други део пројекта је укључивао пројектовање система сушења за лигнит North Dakota и суббитуминозни угаљ Powder River Basin (PRB) који се сагоревају у електрани и анализу утицаја рада система за сушење на расхладни торањ воде, специфичну потрошњу блока, сопствену потрошњу и емисију загађујућих материја у ваздух. Анализирана су два пројектована система сушења:

- први систем сушења, скраћеница CCW (Hot Condenser Cooling Water), користи отпадну топлоту расхладне воде на излазу из кондензатора за загревање ваздуха за сушење угља у флуидизованом слоју,
- други систем сушења представља комбинацију загревања ваздуха отпадном топлотом расхладне воде из кондензатора и отпадном топлотом димних гасова из котла, код кога се могу постићи више температуре сушења него код сушења само отпадном топлотом из кондензатора. Скраћеница овог типа сушења је CCW/FG (Hot Condenser Cooling Water/Boiler Flue Gas).

Резултати за лигнит показују да се смањењем садржаја воде у угљу, повећава степен корисности котла, а смањују специфична потрошња блока и потрошња расхладне воде за оба система сушења CCW и CCW/FG. За бруто производњу електричне енергије од 572 MW и садржај воде у осушеном лигниту од 20%, сопствена потрошња блока се повећава за 17 MW преко основне за CCW систем и релативно је непромењена за CCW/FG систем. Релативно велико повећање сопствене потрошње блока за CCW систем узроковано потребом за великим постројењем за сушење и великим протоком ваздуха за флуидизацију који су потребни CCW систему због ниске температуре сушења. Степен корисности

котла је повећан за 5,5% код CCW система, а 3% код CCW/FG система. Специфична потрошња блока нето је смањена за 3,3% код оба система сушења, а потрошња расхладне воде је смањена за 103,6 m<sup>3</sup>/h код CCW система, а 38,2 m<sup>3</sup>/h код CCW/FG система.

Техно-економске анализе спроведене су да се одреди исплативост CCW и CCW/FG система сушења. Ове анализе претпостављају снабдевање блока лигнитом и бруто електричну излазну снагу од 572 MW. Капитални трошкови инсталисања система за сушење зависе од садржаја влаге у осушеном угљу и у распону су до 24,4 милиона долара за CCW/FG систем сушења и до 91 милион долара за CCW систем.

Годишњи фиксни трошкови су, уз претпоставку да је радни век постројења 20 година и каматна стопа 7,5%, до 4,1 милиона долара за CCW/FG систем и до 15,5 милиона долара за CCW систем.

Allardice и Young су се бавили анализама и применом различитих технологија уклањања влаге приликом сагоревања нискоквалитетних аустралијских угља: Loy Yang, Yallourn, Morvell и др. у термоенергетским постројењима. Анализирали су више технологија одстрањивања влаге :

- "on-line" сушење у интегрисаном систему млин/сушара приликом сагоревања угља у спрашеном стању,
- сушење интегрисаним комбинованим циклусом сушења и гасификације (Integrated Drying Gasification Combined Cycle - IDGCC), који даје значајну ефикасност побољшања и уштеде у односу на конвенционални систем сушења мрког угља,
- хидро-термичко одстрањивање влаге (Hydro-Thermal Dewatering - HTD),
- механо-термичко истискивање влаге (Mechanical Thermal Expression - MTE),
- процес брикетирања,
- карбонизација (деволатилизација) брикета мрких угљева врелим гасовима
- сушење паром у флуидизованом слоју,
- соларно сушење мрких угљева и др.

Висок садржај влаге Yallourn угља (66% или 2 тоне воде за сваку тону сувог угља) захтева раздвајање грубљих и финијих честица угља који се сагорева. Употребом центрифугалних сепаратора, до 80% грубљих честица угља се издваја

и у богатој аеросмеси уводи у котлоу кроз главне горионике да се постигне стабилан пламен, а преосталих 20% финијих честица угља се уводи кроз помоћне горионике (горионике "отпарака") заједно са воденом паром, насталом испаравањем влаге из угља и рециркулационим димним гасом.

Ова основна технологија је примењена на термоелектранама Yallourn и Loy Yang. Угаљ Morvell, који се користи у термоелектрани Hazelwood Power Station, својим мањим садржајем влаге (60% или 1.5 t воде / t сувог угља) и већом лакоћом паљења, не захтева раздвајање честица кроз главне и помоћне горионике у интегрисаном систему млин / сушара.

За Latrobe Valley угаљ, интегрисани комбиновани циклус сушења и гасификације подиже степен корисности термоелектране на 38-41%, рачунато на бази горње топлотне моћи, у зависности од садржаја влаге угља. Ово је знатан напредак у односу степен корисности термоелектране од 29% остварен у најновијим конвенционалним блоковима који сагоревају ове угљеве. Поред тога, емисија гасова стаклене баште из термоенергетских постројења које примењују IDGCC технологије се снижава за 20-30% [29].

Процес механо-термичког истискивања влаге (Mechanical Thermal Expression - MTE) може смањити садржај влаге мрког угља испод 25%, уз врло малу потрошњу енергије и значајно смањење емисије гасова стаклене баште у односу на конвенционални начина производње електричне енергије сагоревањем мрког угља. Процес је био изведен на постројењу кашацитета 10 t/h на Rheinbraun и сада је приоритетан процес сушења центра за удружена истраживања за чисте технологије конверзије лигнита (Cooperative Research Centre for Clean Power from Lignite) и има значајан удео у тренутном истраживачком програму.

Центар за удружена истраживања за чисте технологије конверзије лигнита развија систем сушења механо-термичког истискивања влаге као практичан концепт за модификацију у постојећим котловима или за предсушење лигнита који се користи у електранама са интегрисаним комбинованим циклусом гасификације (IGCC plant, McIntosh, 2001). Центар је закључио да је механо-термичко истискивање влаге јефтинија технологија и омогућава веће повећање степена корисности у енергетским постројењима од хидро-термичког одстрањивања влаге или сушења паром у флуидизованом слоју. Сваки процес

уклањања влаге или сушења који може да уклони воду из мрког угља у течном облику има потенцијал да смањи и до 25%, емисију гасова стаклене баште настале сагоревањем ових угљева.

У блиској будућности и даље ће преовладавати употреба мрког угља за производњу електричне енергије у Викторији. Једини проблем за постојећа постројења јесте испуњење захтева у погледу емисије гасова стаклене баште и високих казни које су уведене селективно за постојећа постројења мрког угља. Нове технологије у производњи електричне енергије, као што су IDGCC или МТЕ / IGCC нуде значајна побољшања у повећању степена корисности термоелектрана и смањења емисије гасова стаклене баште. Ови системи ће бити спремни за следећу генерацију термоелектрана и имају значајне могућности за имплементацију у другим земљама које користе нискокалоричне угљеве [29].

Грчки научници Kakaras, Agraniotis, Grammelis и др., у сарадњи са државном компанијом за производњу електричне енергије PPC (Public Power Corporation), су користили више софтверских модела и извршили испитивања и анализе могућности примене различитих поступака одстрањивања влаге, као и њихова поређења, приликом сагоревања грчких лигнита у термоелектранама [30 - 34].

Израдили су термодинамичке упоредне анализе могућности и очекиваних ефеката спрезања различитих технолошких решења за предсушење лигнита на грчким електранама:

1. цевасте добошасте сушаре на пару,
2. WTA процеса сушења грубе гранулације са рекуперацијом енергије рекомпресијом испарене паре,
3. механо-термичког одстрањивања влаге МТЕ.

Почетна истраживања о предсушењу лигнита извршена су на постојећим 300 MW термоблоковима термоелектрана Agios Dimitrios и Florina, које сагоревају лигнит са различитим садржајем влаге. Резултати су показали да се у случају блока 5 термоелектране Agios Dimitrios, која користи сирови угаљ са већим садржајем влаге (55%), може очекивати значајније повећање степена корисности блока него код ТЕ Florina, која сагорева лигнит са мањим садржајем влаге (36,7%). Сва три технолошка поступка предсушења би према резултатима анализе дала значајно повећање степена корисности блока, али међу њима постоји разлика

због различите потрошње енергије за сам процес сушења. Резултати ове термодинамичке анализе за блок 5 од 339 MW термоелектране Agios Dimitrios показују да би примена дисконтинуалног МТЕ процеса, због најмање специфичне потрошње енергије за сушење лигнита, дала највеће ефекте тј. повећање степена корисности блока за 7,39% (са 37,09% на 44,48%). Код WTA процеса сушења ефекти су нешто нижи тј. повећање степена корисности блока је од 4,61% до 6,9% зависно од начина спрезања са блоком тј. од притиска паре у сушари. Најмање повећање степена корисности блока може се очекивати применом цевасте добошасте сушаре од 0,24% до 4,71%, зависно од притиска паре у сушари [31].

Количина од 110 t лигнита, са садржајем влаге 56%, из рудника "Mavropigi" је транспортована у Немачку где је на RWE WTA експерименталном постројењу на блоку Д термоелектране Niederaussem извршено пробно сушење. На основу успешно обављеног сушења одређена је зависност садржаја равнотежне влаге у угљу од температуре паре у флуидизованом слоју за испитивани грчки лигнит, која указује да је у односу на рајнски лигнит за исту равнотежну влагу (нпр 12%) потребна виша температура слоја (за 1 K) а то значи и већу енергетску потрошњу за исти ниво излазне влаге. Основни закључак извршеног пробног сушења јесте да не постоји битна разлика у понашању грчког лигнита у односу на рајнски и да треба очекивати успешно сушење грчког лигнита на индустријском WTA постројењу, односно да се WTA технологија може у потпуности применити за постојеће термоблокове у Грчкој у циљу подизања њихове ефикасности и смањења негативног еколошког утицаја.

Пробно осушени грчки лигнит је експериментално сагореван у  $1\text{MW}_{\text{th}}$  RWE VVA полуиндустријском постројењу на блоку С термоелектране Niederaussem у циљу одређивања услова за сагоревање предсушеног угља (до равнотежне влаге од 12%) или његово косагоревање са ровним лигнитом при одређеном масеном односу, и утврђивања могућих пратећих негативних појава као што су прљање и зашљакивање грејних површина, што је карактеристично за грчке лигните [30].

Извршено је индустријско косагоревање предсушеног (садржаја влаге 12,5% и доње топлотне моћи 15 MJ/kg) и сировог лигнита (садржаја влаге 58% и доње топлотне моћи 5,9 MJ/kg) на малој термоелектрани Liptol у Грчкој, која ради у оквиру постројења за брикетирање и има два котла капацитета по 80 t/h и две

турбине од 10 и 33 MWel. Предсушени угаљ за ове експерименте је прашина из брикетирнице издвојена на електрофилтеру а за његово сагоревање су коришћени посебни експериментални горионици капацитета до 2 kg/h.

Додатне термодинамичке анализе су обављене у циљу одређивања потенцијала повећања ефикасности постојећих термоблокова увођењем WTA процеса предсушења и косагоревањем предсушеног (садржаја влаге 12%) и сировог лигнита (садржаја влаге 54%) у ложишту постојећих термоблокова. Термодинамичке анализе за блок 5 од 339 MW термоелектране Agios Dimitrios показују резултујуће повећање степена корисности котла од 90% до 92,7% и степена корисности блока нето од 35,4% до 36,4% у распону од 0 до 30% термичког учешћа предсушеног угља у укупној енергији горива.

Током испитивања уочене су конкретне предности "WTA сушења" у циљу повећања ефикасности парног циклуса, док је код МТЕ процеса уочен проблем сложености рада због потребних механичких покретних делова, иако су резултати обећавајући у смислу повећања степена корисности постројења. Процес сушења воденом паром у флуидизованом слоју под надпритиском (DDTW) је такође још једна алтернатива која се тренутно истражује, који је такође сложен због софистициране конструкције за постизање и очување високог притиска.

Извршене су и анализе сушења ваздухом са десет различитих варијанти сушења, при чему се ваздух предгрева различитим изворима топлоте: врућа напојна вода, топлотне пумпе, комбинација топлотних пумпи и вруће напојне воде и одузимање паре из парне турбине. У три варијанте је угаљ осушен на садржај влаге од 35%, док је у осталих седам угаљ осушен на садржај влаге од 25%. Температуре ваздуха за сушење су износиле 60°C у шест варијанти, и 110°C и 140°C у по две варијанте.

Ваздух као агенс сушења има у општем случају мали користан утицај на перформансе електране за улазне температуре ваздуха од 60°C. То се углавном приписује потрошњи електричне енергије на вентилаторе ваздуха за сушење. Због одузимања велике количине напојне воде (око 15% од укупне воде) за загревање ваздуха у два случаја дошло је до повећаног пада бруто излазне снаге. Код варијанти са одузимањем паре производња паре није утицала на пад бруто излазне снаге јер се више паре одузима из турбина на ниском притиску за

предгревање напојне воде. Одузимање напојне воде из резервоара је најбоље опција као извор топлоте за загревање ваздуха, за одређене садржаје влаге сушеног горива.

За варијанте које користе топлотне пумпе као извор загревања ваздуха повећава се сопствена потрошња електричне енергије за рад топлотних пумпи и додатно погоршава степен корисности постројења. За опције са употребом топлотних пумпи најбоље су се показале оне које користе спрегнута два топлотна извора: топлотне пумпе и врелу напојну воду. За температуре ваздуха веће од 60°C (110°C и 140°C) примене топлотних пумпи се нису ефикасно показале, па су поређене варијанте са одузимањем паре и напојне воде.

Као најбоља опција се показала опција са одузимањем напојне воде за загревање ваздуха на 110°C када је постигнут највечи степен корисности блока нето од 40,46%. Даље повећање температура загрејаног ваздуха ограничава побољшање степена корисности блока, пошто се бруто излазна снага значајно смањује због одузимања велике количина напојне воде за загревање ваздуха (око 25% од укупне количине воде) уз одговарајућу употребу велике количине одузете паре за загревање напојне воде.

Код загревања ваздуха одузимањем паре из турбине (две варијанте), случај је обрнут, што је виша температура загрејаног ваздуха потребна је мања количина одузете паре када се одузима са више температуре. За температуру загрејаног ваздуха од 140°C степен корисности блока нето је 40,04%, а за температуру загрејаног ваздуха од 110°C степен корисности блока нето је 39,92% [34].

У Немачкој су највише вршена испитивања из области предсушења угља воденом паром у флуидизованом слоју. Развијено и примењено више технологија на експерименталним и пробним постројењима термоелектрана [35, 36].

У рад је пуштено неколико нових термоблокова на угаљ за производњу електричне енергије са унапређеном технологијом. Током 1997/98. пуштена су у рад два блока по 775 MW у термоелектрани „Schwarze Pumpe“ са суперкритичним парним котлом новог типа. Блок К од 1000 MW Термоелектране „RWE Niederaussem“ пуштен је у погон 2002. године, тзв. ВоА-постројење. ВоА (Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik) је електрана на мрки угаљ са оптимизованом шемом и супернадкритичним параметрима свеже паре: 27,4 МПа,



580°C и 600°C међупрегрејане паре. Ова оптимизација подразумева читав низ мера на унапређењу енергетске ефикасности рада блока као што су: већи степен корисности парне турбине и унапређен систем за рекуперацију топлоте димних гасова, што доводи до повећања укупног степена корисности постројења на 43,2÷45%.

Следећи технолошки помак на овом блоку је демонстрација коришћења развијене технологије предсушења угља са високим садржајем влаге помоћу нискотемпературног извора топлоте која треба да доведе до подизања степена корисности блока на 45% (по основу сагоревања предсушеног угља до удела од 30%). Најнапреднија технологија оваквог начина сушења је WTA поступак, које се обавља у контактним сушарама са флуидизованим слојем, а стање флуидизације се остварује благо прегрејаном воденом паром. Сам поступак, као и фазе развоја су описани у уводном поглављу. У Немачкој се ради на даљем развоју и унапређењу ВоА-технологије за лигните. Поред постојећег постројења ВоА-1 у Niederaussem-у развијају се и нова ВоА-2/3 у Neurath-у.

Немачка компанија „RWE Power AG“ је до сада изградила или гради неколико WTA постројења [37]:

- WTA 1 Frechen, прво демонстрационо постројење базирано на WTA технологији: сушење угља грубе гранулације воденом паром са компресијом паре и предгревањем угља: 53 t/h сировог угља, 28 t/h осушеног угља,
- WTA 1 Niederaussem: сушење угља грубе гранулације воденом паром са компресијом паре: 170 t/h сировог угља, 90 t/h осушеног угља,
- WTA 2 Frechen: сушење угља fine гранулације воденом паром са парцијалном кондензацијом паре: 27 t/h сировог угља, 14 t/h осушеног угља,
- WTA 2 Niederaussem: сушење угља fine гранулације са кондензацијом паре: 210 t/h сировог угља, 110 t/h осушеног угља,
- WTA Hazelwood – Аустралија (планирана градња): сушење угља fine гранулације без утилизације водене паре: 140 t/h сировог угља, 70 t/h осушеног угља.

На основу експерименталних испитивања одређене су равнотежне криве на притиску од око 1.1 bar за немачке (рајнске) и аустралијске лигните. Може се видети да се на температури од око 110°C (рајнски) и од око 107°C (аустралијски)

постиге равнотежни садржај влаге у угљу од око 12%. Регулисањем температуре флуидизованог слоја могуће је подесити и одржавати константним жељени садржај влаге у осушеном угљу.

Може се констатовати да је за сада немачка технологија (WTA процес сушења угља) преовлађујућа у земљама чланицама Европске Уније, иако постоје појединачна истраживања и развој технологија сушења/предсушења угља (Данска – "NIRO A/S" [38], Финска – "Fortum Power and Heat Oy" [39]). Такође, немачки произвођачи WTA технологија се пробијају и на тржиште Аустралије (WTA Hazelwood).

Најновија технологија сушења угља воденом паром у флуидизованом слоју под надпритиском (DDWT процес сушења) је тренутно у фази развоја. Флуидизовани слој угља је под надпритиском (4÷6 bar), чиме се повишава радна температура у сушари до 180°C и убрзава процес сушења, а за загревање слоја уроњеним размењивачем топлоте користи се засићена водена пара притиска 10÷12 bar.

Експериментално постројење на Бранденбуршком техничком универзитету Котбус (Brandenburgische Technische Universität - BTU Cottbus) капацитета 0,25÷0,5 t/h сировог угља, садржаја влаге 50÷60%, гранулације 0÷6 mm и производње 0,125÷0,25 t/h осушеног угља садржаја влаге 10÷15% (фаза1) је у функцији од 2006. године. Радни притисак у сушари је 1,2÷6,5 bar [40].

Пилот-постројење (фаза 2) капацитета 8 до 10 t/h сировог угља fine гранулације, производње 4 до 6 t/h осушеног угља садржаја влаге 12% до 17% и радног притиска у сушари од 1 до 6 bar-a, је изградила компанија "Vattenfall Europe" (2008. године) на подручју индустријског парка "Schwarze Pumpe". Следећи корак у развоју DDWT процеса је изградња пробног постројења. Добијени резултати ће послужити за поређење са осталим поступцима сушења и одређивање могућности и сврсисходности индустријске употребе DDWT поступка у термоелектранама на угаљ. Искуства са оба постројења (експериментално постројење "BTU Cottbus" и пилот-постројење "Schwarze Pumpe") представљају основу за следећи корак - конципирање и изградњу "Großtechnischen Versuchsanlage" (GTVA, 70 t/h).

Agun S. Miјumdar и сарадници, на основу објављених радова своје групе и осталих јавно објављених радова других аутора, издали су више књига у којима је направио је преглед, анализе и поређења нискоквалитетних угљева и садашњих технологија сушења и одстрањивања влаге из нискоквалитетних угљева у свету. Поред тога, дали су преглед области истраживања и технологија које ће се у будућности потенцијално користити у процесима оплемењивања нискоквалитетних угљева. Приказали су како изабрати најпогоднији систем сушења у зависности од врсте угља и намене постројења, потребног капацитета и гранулације осушеног угља, као и инвестиционих улагања [41 - 44].

Такође, дали су анализе фактора који утичу на квалитет процеса сушења, као и карактеристике различитих процеса сушења нискоквалитетних угљева, њихове предности и мане у поређењу са другим процесима одстрањивања влаге.

#### 3. ФИЗИЧКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА УГЉА

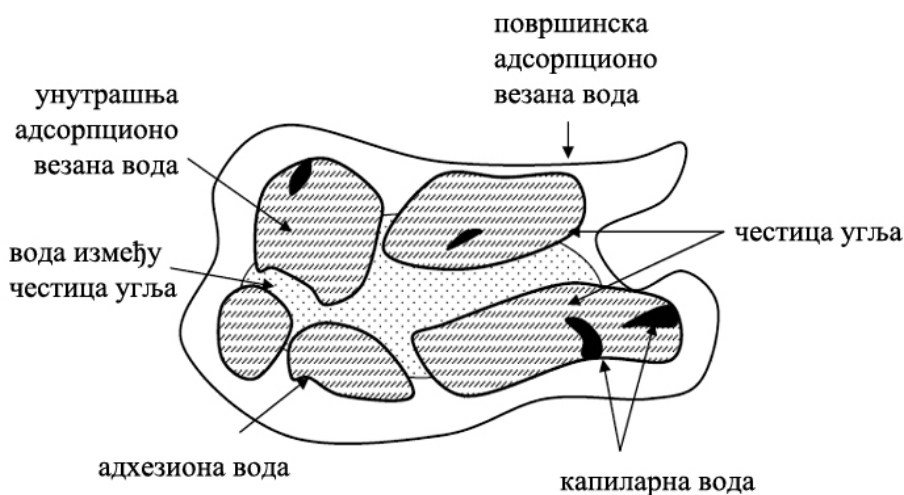
##### 3.1 Типови везе влаге у угљу

Различити типови везе влаге у угљу су приказани на слици 3.1 и могу бити класификовани на следећи начин [41]:

- физичко-хемијски везана влага, која је јаче везана за угљ. То је адсорпционо везана влага, која може бити унутрашња и површинска. Унутрашња влага се налази у микро-порама и микро-капиларима сваке честице угља, а депонована је током формирања угља. Површинска влага образује слој молекула воде везаних за молекуле угља, али само на површини честице угља,

- механички везана влага, која је слабије везана за угљ, а налази се у капиларима и малим шупљинама угља. У појединачној честици угља налази се у капиларима и малим шупљинама саме честице, а између честица угља налази се у капиларима и малим шупљинама између две или више честица угља,

- влага квашења (адхезиона влага) – образује слој влаге око спољашње површине појединачне честице угља или око агломерисаних угљених честица.



Слика 3.1 Различити типови везане влаге/воде у угљу [41]

#### 3.2 Поступци уклањања влаге из угља

Процеси уклањања влаге (сушење–Drying и одстрањивање–Dewatering) из разноврсних материјала у различитим гранама индустрије (енергетици, хемијској и фармацеутској индустрији, прехранбеној индустрији итд.) представљају једну од најраспрострањенијих технолошких операција, при чему су процеси сушења далеко више заступљени у постојећим постројењима од процеса одстрањивања. Суштинска разлика ових процеса је у томе што се поступком сушења влага из материјала уклања у гасовитом/парном стању, а поступком одстрањивања у течном стању.

До сада су познати следећи поступци смањења садржаја влаге угља [45]:

- сушење воденом паром, ваздухом или димним гасом у флуидизованом слоју,
- сушење интегрисано са гасификацијом (Integrated Drying Gasification),
- "згушњавање" угља (Densified Brown Coal),
- механо-термичко истискивање влаге (Mechanical Thermal Expression - MTE),
- хидро-термичко одстрањивање влаге (Hydro-Thermal Dewatering - HTD),
- механичко уклањање влаге центрифугирањем.

Концепти сушења угља прегрејаном воденом паром (DWT и WTA процес сушења) и ваздухом у флуидизованом слоју представљени су у уводном поглављу. Сушење воденом паром у флуидизованом слоју под надпритиском (Druckaufgeladene Dampf-Wirbelschicht-Trocknung) је најновија технологија сушења угља воденом паром у флуидизованом слоју, при чему је основна разлика у односу на претходне технологије (DWT & WTA) употреба флуидизованог слоја под надпритиском (4÷6 bar), чиме се повишава радна температура у сушари до 180°C и тиме убрзава процес сушења. За загревање слоја се користи засићена компримована водена пара притиска 10÷12 bar (коришћењем латентне топлоте кондензације паре) изузета са парне турбине, која пролази кроз грејач уроњен у слој.

Сушење интегрисано са гасификацијом (Integrated Drying Gasification) развијено и демонстрирано од стране компаније „HRL Pty Ltd”. Успешно је изведено на 10 MW пилот-постројењу у подручју „Latrobe Valley” (Аустралија). У току је демонстрациони пројект на постројењу од 400 MW. Овај процес користи

врели гас из гасификатора са флуидизованим слојем за предсушење угља под надпритиском, након чега се гас хлади, одпрашује и сагорева за потребе циклуса гасне турбине. Укупан проток гаса је увећан услед водене паре настале сушењем угља.

Поступак "згушњавање" угља (Densified Brown Coal) је развијен и патентиран на Универзитету у Мелбурну средином 80-их година прошлог века, а комерцијализовала га је компанија „Victorian” (Аустралија). Ситњењем свеже ископаног угља производи се ситнозрнаста смеса (глинасте структуре), која се након тога суши ваздухом до ниског садржаја влаге, чиме се добија производ са својствима еквивалентним мрком односно каменом угљу.

Процес Механо-термичко истискивање влаге (Mechanical Thermal Expression - МТЕ) је развијен на Универзитету у Дортмунду, Немачка. Угаљ се смешта у комору и предгрева распрскавањем топле воде добијене сушењем претходне шарже угља. Топла вода се додатно утискује кроз слој угља помоћу засићене водене паре која се уводи у комору. Топла вода предаје угљу своју физичку топлоту и напушта комору (као и сам процес) на температури од око 30°C. Након тога се кондензовањем водене паре, која се доводи у комору, угаљ загрева на 180÷200°C. Потом се у комору поново уводи топла вода притиска 60 bar, којом се влага дословно истискује из угља. Вода издвојена током ове фазе се одводи у посебан резервоар и користи за почетак процеса следеће шарже. Испресовани угаљ се празни из коморе, растреса/дроби и хлади. Током последње фазе се такође одстрањује део влаге из угља. МТЕ процес се не одвија континуално, већ циклично.

До сада је тестиран на мањим постројењима. Узорци рајнског лигнита су овим поступком сушени са 55% садржаја влаге на 25% на температури од 200°C. Постројење капацитета 1 t/h је саграђено и тестирано у Мелбурну (Аустралија), а демонстрационо постројење од 15 t/h је изграђено на подручју "Latrobe Valley".

Хидро-термичко одстрањивање влаге (Hydro-Thermal Dewatering - НТД) је еволуирало из Флајснеровог (Fleissner) поступка [46]. Сирови угаљ се загрева на температуру од 250÷300°C (помоћу воде, водене паре, уља итд.) на довољном притиску како би се избегло кључање воде. Тиме настају физичко-хемијске

промене структуре угља (угаљ се ломи и сабија), при чему се влага ослобађа у течном стању и одваја након хлађења и снижења притиска центрифугирањем.

Фирма „Exergen“ је развила ефикасан континуални реактор за хидро-термичко одстрањивање влаге лигнита. Реактор и процес капацитета 4 t/h, радних параметара 280 °C и 70 bar је успешно демонстриран на постројењу у Тасманији. Од 2006. године, у сарадњи са инжењерском фирмом "Thiess" и произвођачем алуминијума "Alcoa of Australia's Anglesea Power Station", даље ради на развоју "scale-up" свог HTD реактора и процеса при чему ће се радни параметри повећати на 300°C и 100 bar, неопходних за комерцијализацију поступка [47 - 48]. У плану је изградња демонстрационог постројења капацитета 200÷350 t/h у подручју "Latrobe Valley".

Филтрација у пољу центрифугалне силе се користи за одстрањивање влаге из угља, при чему се највише примењују вибрационе центрифуге (за грубу гранулацију > 1 mm) и "Scroll" центрифуге (за фину гранулацију 0,1÷1 mm). Садржај влаге осушеног угља код вибрационе центрифуге износи 5÷10 % при центрифугалној сили 60÷75 g и капацитету сушења је 100 t/h, а код "Scroll" центрифуге садржај влаге осушеног угља је 12÷16% при центрифугалној сили 110 g и капацитету сушења је 60÷70 t/h.

#### 3.3 Конвективно сушење

Сваки материјал има своје специфичности у погледу сушења које зависе од:

- његових физичко-хемијских особина: чврст, течан, кристалан, аморфан, лепљив; тврд, мекан, ломљив, лако запаљив, експлозиван, ...
- величине и облика честица: прашкаст, ситнозрнаст – fine гранулације, зрнаст – средње гранулације, крупнозрнаст – грубе гранулације, комадаст, плочаст, сферичан, игличаст,...
- садржаја и начина везе влаге: механички везана влага – влага квашења и капиларна влага; физичко-хемијски везана влага – адсорпционо и осмотски; хемијски везана влага,

тако да сваки материјал треба испитати и одредити његове карактеристике, односно параметре који утичу на процес сушења.

Топлота се доводи материјалу на више начина:

- конвекцијом (прелаз), кондукцијом (провођење/контакт), радијацијом (зрачење), електромагнетно или комбинацијом претходних начина,
- адијабатски и неадијабатски,
- непрекидно или повремено.

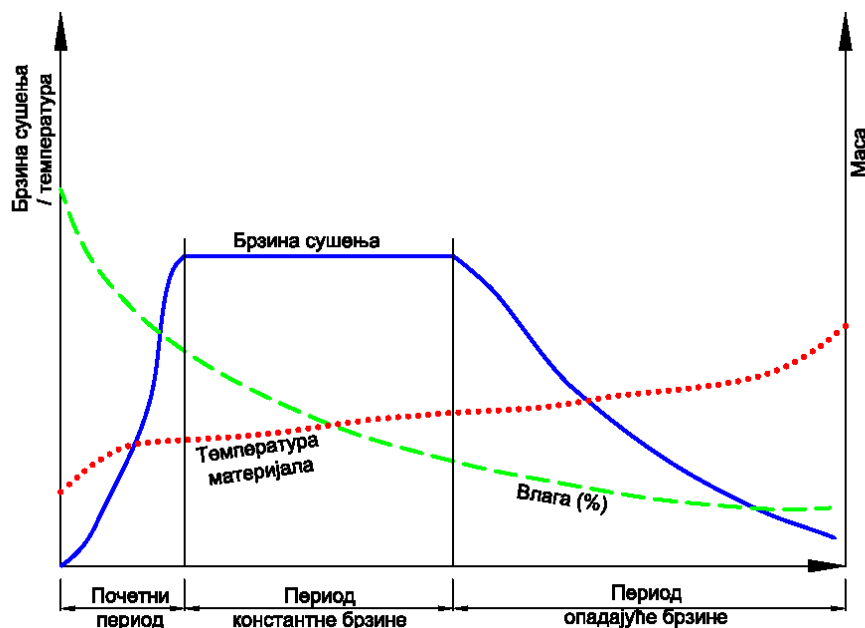
Да би се могло одредити трајање процеса сушења одређеног материјала потребно је познавати његову кинетику сушења, односно промену средњег садржаја влаге и средње температуре са временом. Приликом трајања процеса сушења неког влажног материјала могу се уочити три типична периода (слика 3.2): период загревања материјала, период константне брзине сушења и период опадајуће брзине сушења.

У првом периоду, тј. периоду загревања материјала расположива топлота у сушари се троши на загревање влажног материјала. Ову фазу је могуће избећи или скратити уколико се материјал предгреје коришћењем неког вида отпадне топлоте, пре уласка у сушару. Током ове фазе долази до константног раста брзине испаравања влаге, при чему се испарава углавном слободна влага.

Током периода константне брзине сушења површина материјала који се суши садржи довољно влаге и брзина испаравања влаге се веома мало мења током смањивања садржаја влаге у материјалу. Током ове фазе брзине сушења су велике, тако да се могу користити више температуре носилаца топлоте (агенса сушења или размењивача топлоте) без бојазни од прегревања материјала, који се током ове фазе мало и веома постепено загрева.

За време периода опадајуће брзине сушења транспорт влаге из унутрашњости материјала ка површини је чинилац који ограничава процес сушења, односно доводи до смањења брзине сушења. Начин и брзина простирања влаге кроз материјал је специфичан за сваку појединачну врсту материјала, па брзина сушења у овом случају може бити дефинисана само употребом емпиријских метода (експериментом) или нормализацијом криве сушења [49] појединачне честице влажног материјала.





Слика 3.2 Типичне криве кинетике процеса сушења [50]

Најраспрострањенији начин сушења великог броја различитих материјала је конвективно сушење. Овај процес подразумева контакт влажног материјала и агенса сушења (ваздух, прегрејана водена пара, инертни гасови, гасовити продукти сагоревања). Задатак агенса сушења је да преда топлоту коју поседује влажном материјалу (конвективним преносом топлоте), а да истовремено са површине материјала покупи и одведе испарену влагу (конвективном дифузијом).

Загрејани ваздух (незасићен влажан ваздух), у околини најрасположивија и најјефтинија смеша гасова, се најчешће користи као агенс сушења у процесима конвективног сушења различитих производа. Како садржи значајну количину кисеоника, није погодан при сушењу материјала склоних оксидацији, а температура овог агенса сушења је значајно лимитирана у случају сушења запаљивих материјала.

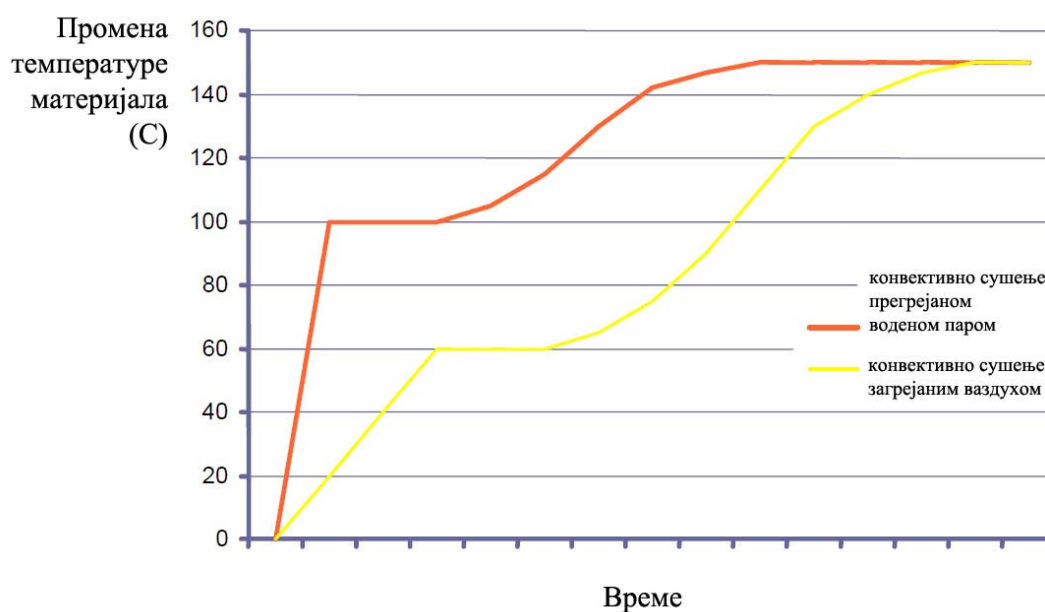
Употреба инертних гасова је на одређени начин ограничена релативно високим трошковима производње ових гасова, па се најчешће своди на примену у процесима сушења специфичних (нпр. експлозивних) материјала.

Гасовити продукти сагоревања настали сагоревањем горива на излазу из ложишта (димни гасови) имају релативно високу температуру (неколико стотина °C), која није увек сврсисходна, па се најчешће мешају са влажним ваздухом, како би се добио агенс сушења одговарајуће температуре.

### 3. Физички модел процеса сушења угља

---

Сушење прегрејаном воденом паром је у већини аспеката слично сушењу загрејаним ваздухом. У оба случаја агенс сушења предаје енергију потребну за загревање влажног материјала и испаравање влаге, односно воде, а такође односи испарену влагу. Међутим, постоје веома јасне разлике између ова два процеса. Основна разлика се огледа у температури материјала који се суши током процеса сушења. Температура влажног термометра током периода константне брзине сушења је нижа, 40 до 70°C, током сушења загрејаним ваздухом у поређењу са сушењем прегрејаном воденом паром, али је крајња, односно максимална температура продукта, једнака у оба случаја, како је приказано на слици 3.3.



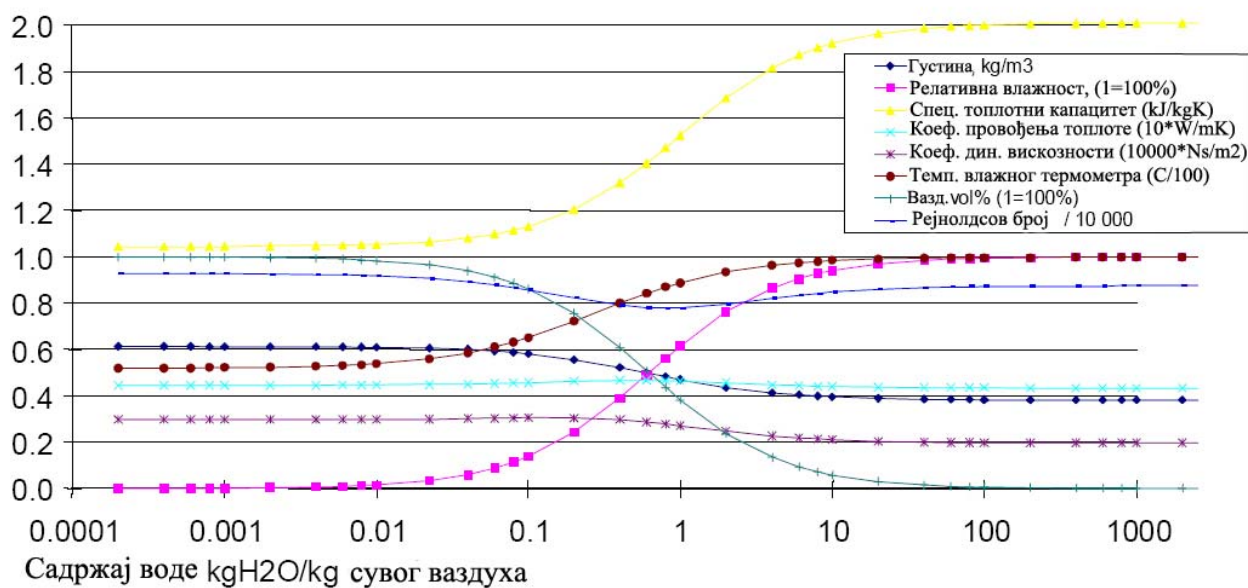
Слика 3.3 Промена температуре материјала који се суши током конвективног сушења загрејаним ваздухом и прегрејаном воденом паром [51]

При сушењу прегрејаном воденом паром температура материјала расте брже него при сушењу загрејаним ваздухом, што је изазвано кондензацијом водене паре на материјалу. Чим температура материјала достигне температуру влажног термометра за водену пару (100°C на 1,0 bar) материјал почиње да се суши. Током периода константне брзине сушења температура материјала зависи од притиска водене паре.

Како се у оба случаја ради о конвективном сушењу (гасовитим агенсом сушења) већина сушара са прегрејаном воденом паром је компатибилна сушарама

### 3. Физички модел процеса сушења угља

са загрејаним ваздухом у смислу конструкције и начина рада. Основна разлика настаје услед различитих физичких карактеристика водене паре и ваздуха, као што су специфична енталпија, специфични топлотни капацитет, вискозност и проводљивост топлоте. На слици 3.4 су представљене различите физичке особине сувог ваздуха (лева страна) и чисте водене паре (десна страна) на 300°C (као пример). Такође се могу прочитати особине мешавине сувог ваздуха и водене паре.



Слика 3.4 Различити физички параметри мешавине ваздуха и водене паре [51]

Већи специфични топлотни капацитет прегрејане водене паре проузрокује веће брзине сушења. Са друге стране разлика температура између агенса сушења и материјала који се суши током периода константне брзине сушења је мања за случај сушења прегрејаном воденом паром зато што је у том случају температура влажног термометра виша. Ово води ка такозваној инверзној тачки, односно инверзној температури, која представља температуру на којој брзина испаравања има исту вредност за оба агенса сушења (водену пару и ваздух). На температурама вишим од инверзне је брзина сушења већа са прегрејаном воденом паром него са загрејаним ваздухом. Инверзна температура је углавном у границама 150÷200°C, уколико су протоци водене паре и ваздуха једнаки.

Постоје различите варијанте конвективног сушења у циљу постизања како одговарајућих параметара процеса сушења, тако и уштеде енергије потребне за процес сушења, а најзначајније су [52]:

- сушење са међузагревањем агенса сушења,
- сушење са рецикулацијом израђеног агенса сушења,
- сушење са међузагревањем и рецикулацијом израђеног агенса сушења,
- сушење по затвореном циклусу са кондензацијом испарене влаге.

#### 3.4 Основна поставка модела преноса топлоте и супстанције у процесу конвективног сушења

Конвенционално евапоративно конвективно сушење укључује сложене феномене преноса који се одвијају у три истовремена процеса. Први процес је кретање влаге (течности) у чврстој материји од унутрашњости ка његовој површини. Овај процес је спорији у случају већих честица (комада) чврстог материјала, односно код материјала са ниским садржајем влаге. Други процес је испаравање влаге довођењем топлотне енергије потребне за фазну трансформацију течности у пару, која се може довести споља или узети од чврстих честица. Трећи процес је кретање паре у околни гас конвекцијом и дифузијом. Најспорији од ова три наведена процеса одређује брзину сушења. Теоријско предвиђање брзине сушења је веома тешко, па је уместо тога неопходно обавити довољно прецизне експерименте са појединачним честицама или у елементарном слоју честица. Могуће је дефинисати брзине сушења под различитим условима применом концепата као што је "карактеристична крива сушења" [53 - 54] или "коэффициент сушења" [55 - 56].

Експериментална испитивања трају дуго и најчешће захтевају велика финансијска улагања. Развојем поузданог математичког модела процеса сушења могу се прецизно предвидети температура и садржај влаге осушеног материјала у функцији времена и/или положаја у сушари. Такође, може се проценити време боравка или димензије сушаре који су потребни да се одређени материјал осуши до жељеног садржаја влаге.

Веома обимна истраживања су обављена у циљу моделирања и анализе процеса сушења у флуидизованом слоју како за континуалне тако и за шаржне сушаре [57 - 67]. Сваки од развијених модела има своје специфичности, али је заједничка особина за све моделе да користе коефицијенте прелаза топлоте и супстанције карактеристичне за процесе у флуидизованом слоју.

За потребе сушења домаћег лигнита са великим садржајем влаге у непокретном и флуидизованом слоју развијен је постојећи математички модел који описује пренос топлоте и супстанције између чврсте, гасне и мехурасте фазе, а заснован је на двофазном моделу мехурастог флуидизованог слоја аутора Kunii и Levenspiel-a [68]. Основна идеја овог математичког модела је да се пренос топлоте и супстанције између гаса и честица чврсте фазе (односно, процес сушења) у суспензионој фази, као и у случају сушења честица насутог слоја, може израчунати коришћењем концепта "коефицијента сушења", при чему се прорачун обавља за елементарне слојеве (запремине) и уопштавањем за цео слој честица. Утицај мешања честица, које се одвија у покретном слоју (флуидизовани слој, виброфлуидизовани слој, ротациони слој, итд.), изазван кретањем мехура у флуидизованом слоју, је урачунат помоћу дифузионог члана у одговарајућим диференцијалним једначинама и рачуна се коришћењем коефицијената дифузије честица [68].

Диференцијалне једначине које описују принцип одржања опште зависно променљиве величине ( $\Phi$ ), у случају нестационарног проблема, могу се изразити у следећем општем облику, као што је предложио Патанкар [69]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \cdot \Phi) + \text{div}(\vec{v} \cdot \rho \cdot \Phi) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \cdot \text{grad}\Phi) + S_{\Phi} \quad (3.1)$$

Први члан са леве стране једначине (3.1) се назива "нестационарни члан" (брзина промене зависне величине), а други члан је конвективни члан. Први члан на десној страни је дифузиони члан. "Коефицијент дифузије" је означен са  $\Gamma_{\Phi}$ . "Изворни члан"  $S_{\Phi}$ , који обухвата генерисање и дисипацију величине  $\Phi$ , садржи све облике међуфазних транспортних закона. "Коефицијент дифузије" и "изворни члан" зависе од физичког значења променљиве  $\Phi$ . При конвективном сушењу, садржај влаге  $X$  и енталпија (тј. температура  $T$ ) материјала који се суши, као влажност  $Y$  и енталпија (тј. температура  $T$ ) коришћеног агенса сушења, представљају посебне случајеве опште зависне променљиве које треба одредити.

#### 4. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ ПРОЦЕСА СУШЕЊА УГЉА

##### 4.1 Математички модел сушења у непокретном слоју

За потребе истраживања конвективног сушења у насутом/непокретном слоју, за различите биолошке материјале (зрна кукуруза, соје, коцкице кромпира, семе мака, итд, [70 - 73], развијен је једнодимензиони нестационарни математички модел процеса конвективног сушења. Овај модел, који описује истовремени пренос топлоте и супстанције између гасне фазе и честица влажног материјала током конвективног сушења у непокретном слоју, почива на следећим претпоставкама:

- параметри сушења се мењају дуж само једне координате, односно у вертикалном смеру тока гаса, и само промене параметара у том правцу су разматране и дискутоване,
- све честице су исте величине, облика и густине у једном временском тренутку,
- површина честице чврсте фазе и гаса који је са том површином у контакту су у стању термодинамичке равнотеже,
- брзина сушења се израчунава применом принципа "коефицијент сушења";
- дисперзија супстанције или топлотне енергије у посматраном смеру протока гаса је занемарена.

Применом једначине (3.1) и претходно наведених претпоставки, може се развити следећи систем парцијалних диференцијалних једначина за дефинисање биланса топлоте и супстанције [74]:

Једначина одржања садржаја влаге гасне фазе:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{G,d} \cdot Y) + \frac{\partial}{\partial z} (v_G \cdot m_{G,d} \cdot Y) = \dot{m}_m \quad (4.1)$$

где су:  $\dot{m}_m$  масени проток испарене влаге,  $m_{G,d}$  маса сувог агенса сушења,  $v_G$  брзина агенса сушења и  $Y$  садржај влаге (по сувој основи) агенса сушења. Гранични и почетни услови су:  $Y(0,\tau) = Y_{in}$ , за  $\tau \geq 0$ ,  $Y(z,0) = Y_0(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања садржаја влаге чврсте фазе:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{S,d} \cdot X) + \frac{\partial}{\partial z} (v_S \cdot m_{S,d} \cdot X) = -\dot{m}_m \quad (4.2)$$

где су:  $m_{S,d}$  маса сувог материјала,  $v_S$  брзина честица материјала и  $X$  садржај влаге (по сувој основи) материјала. Почетни услов је:  $X(z,0) = X_0(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања енталпије гасне фазе:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{G,d} \cdot c_G \cdot T_G) + \frac{\partial}{\partial z} (v_G \cdot m_{G,d} \cdot c_G \cdot T_G) = \alpha_{S,G} \cdot a_b \cdot V \cdot (T_S - T_G) + c_V \cdot (T_G - T_S) \cdot \dot{m}_m \quad (4.3)$$

где су:  $c_G = c_{G,d} + c_{m,V} \cdot Y$  специфични топлотни капацитет влажног гаса,  $a_b$  специфична површина слоја,  $\alpha_{S,G}$  коефицијент преноса топлоте између површине честица и гаса у непокретном слоју. Гранични и почетни услови:  $T_G(0,\tau) = T_{G,in}$ , за  $\tau \geq 0$ ,  $T_G(z,0) = T_{G,0}(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања енталпије честица:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{S,d} \cdot c_S \cdot T_S) + \frac{\partial}{\partial z} (v_S \cdot m_{S,d} \cdot c_S \cdot T_S) = \alpha_{S,G} \cdot a_b \cdot V \cdot (T_G - T_S) - r \cdot \dot{m}_m \quad (4.4)$$

где су:  $c_S = c_{S,d} + c_{m,L} \cdot X$  специфични топлотни капацитет влажног материјала,  $a_b$  специфична површина слоја,  $r$  је латентна топлота испаравања воде на температури честица. При чему је:  $T_S(z,0) = T_{S,0}(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина континуитета за гасну фазу:

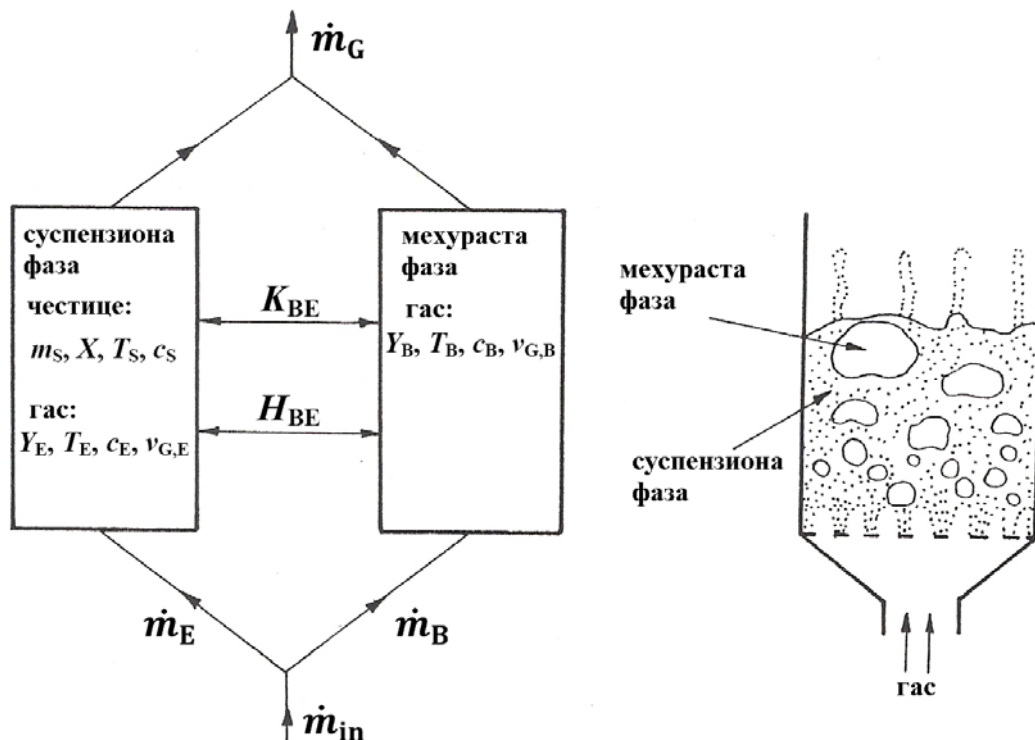
$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_G) + \frac{\partial}{\partial z} (v_G \cdot m_G) = \dot{m}_m \quad (4.5)$$

где су:  $m_G(0,\tau) = m_{G,in}$  и  $v_G(0,\tau) = v_{G,in}$  за  $\tau \geq 0$ .

#### 4.2 Математички модел сушења у флуидизованом слоју

Научници Kunii и Levenspiel су развили математички модел процеса сагоревања у флуидизованом слоју који описује појаве преноса топлоте и супстанције које се јављају између чврстих честица материјала и гаса у мехурастом флуидизованом слоју [68]. Овај модел је тзв. двофазни модел са мехурастом и суспензионом (емулзионом) фазом. Модел подразумева да се почетни проток гаса за флуидизацију дели на део који прострујава кроз суспензиону фазу, при чему се сматра да је суспензиона фаза у стању минималне флуидизације, као и на део (вишак гаса од оног потребног за минималну флуидизацију) који струји кроз мехурасту фазу у виду мехурова, слика 4.1. Основни приступ у овој тези је да се пренос топлоте и супстанције између гаса и

чврстих честица (т.ј. процес сушења) у суспензионој фази израчунава (дефинише) исто као и за случај насутог/непокретног слоја честица.



Слика 4.1 Двофазни модел мехурастог флуидизованог слоја [68]

Поред претходно наведених претпоставки за модел сушења у насутом (непокретном) слоју, за модел сушења у флуидизованом слоју је потребно увести следеће додатне претпоставке:

- суспензиона фаза је у условима минималне флуидизације (може се сматрати насутим слојем честица),
- сав вишак гаса пролази кроз слој у мехурастој фази, која не садржи честице чврсте фазе,
- мехурови су исте величине и равномерно су распоређени у једном попречном пресеку слоја,
- сваки мехур, у кретању навише, у трагу повлачи за собом навише чврсте честице, док се кроз остали део честица у суспензији креће наниже ка дну слоја. На тај начин се остварује мешање честица у слоју,



- влага која испари са површине честица се дистрибуира кроз мехурасту фазу, узрокујући повећање појединачних мехурова и на тај начин формирање мехурова различите величине по попречном пресеку слоја при њиховом кретању навише.

Сходно томе, на основу опште једначине (3.1) може се извести систем парцијалних диференцијалних једначина за случај конвективног сушења у флуидизованом слоју, који се може написати на следећи начин:

Једначина одржања садржаја воде гаса у мехурастој фази:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{G,B,d} \cdot Y_B) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{G,B} \cdot m_{G,B} \cdot Y_B) = m_{G,B,d} \cdot (K_{BE})_B \cdot (Y_E - Y_B) \quad (4.6)$$

где су:  $m_{G,B,d}$ ,  $v_{G,B}$  и  $Y_B$ , маса (сув гас), брзина и садржај воде (по сувој основи) гаса који протиче кроз мехурасту фазу.  $(K_{BE})_B$  је укупни коефицијент размене гаса између мехурасте и суспензионе фазе заснован на запремини мехурова [68]. Гранични и почетни услови су:  $Y_B(0,\tau) = Y_{B,in}$ , за  $\tau \geq 0$ ,  $Y_B(z,0) = Y_{B,0}(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања садржаја воде гаса у суспензионој фази:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{G,E,d} \cdot Y_E) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{G,E} \cdot m_{G,E} \cdot Y_E) = m_{G,E,d} \cdot (K_{BE})_B \cdot (Y_B - Y_E) + \dot{m}_m \quad (4.7)$$

где су:  $m_{G,E,d}$ ,  $v_{G,E}$  и  $Y_E$ , маса (сув гас), брзина и садржај воде (по сувој основи) гаса који протиче кроз суспензиону фазу. Гранични и почетни услови су:  $Y_E(0,\tau) = Y_{E,in}$ , за  $\tau \geq 0$ ,  $Y_E(z,0) = Y_{E,0}(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања садржаја воде честица у суспензионој фази:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{S,d} \cdot X) + \frac{\partial}{\partial z} (v_S \cdot m_{S,d} \cdot X) = \frac{\partial}{\partial z} (m_{S,d} \cdot D_{eff} \cdot \frac{\partial v_S}{\partial z}) - \dot{m}_m \quad (4.8)$$

где је  $D_{eff}$  коефицијент дисперзије честица. При чему је:  $X(z,0) = X_0$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања енталпије гаса у мехурастој фази:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{G,B,d} \cdot c_B \cdot T_B) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{G,B} \cdot m_{G,B} \cdot c_B \cdot T_B) = V_B \cdot (H_{BE})_B \cdot (T_E - T_B) \quad (4.9)$$

где су:  $c_B = c_{G,B,d} + c_{m,v} \cdot Y_B$  специфични топлотни капацитет влажног гаса у мехурастој фази,  $(H_{BE})_B$  је укупни запремински коефицијент преноса топлоте између мехурасте и суспензионе фазе заснован на запремини мехурова [68]. Гранични и почетни услови су:  $T_B(0,\tau) = T_{B,in}$ , за  $\tau \geq 0$ ,  $T_B(z,0) = T_{B,0}(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања енталпије гаса у суспензионој фази:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{G,E,d} \cdot c_E \cdot T_E) + \frac{\partial}{\partial z} (v_{G,E} \cdot m_{G,E,d} \cdot c_E \cdot T_E) = V_B \cdot (H_{BE})_B \cdot (T_B - T_E) + \alpha_{S,G} \cdot a_b \cdot V \cdot (T_S - T_E) + c_v \cdot (T_E - T_S) \cdot \dot{m}_m \quad (4.10)$$

где је:  $c_E = c_{G,E,d} + c_{m,v} \cdot Y_E$  специфични топлотни капацитет влажног гаса у суспензиониј фази. Гранични и почетни услови су:  $T_E(0,\tau) = T_{E,in}$ , за  $\tau \geq 0$ ,  $T_E(z,0) = T_{E,0}(z)$  за  $0 \leq z \leq h$ .

Једначина одржања енталпије честица у суспензиониј фази:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_{S,d} \cdot c_S \cdot T_S) + \frac{\partial}{\partial z} (v_S \cdot m_{S,d} \cdot c_S \cdot T_S) = \frac{\partial}{\partial z} \left( V_S \cdot \lambda_{eff} \cdot \frac{\partial T_S}{\partial z} \right) + \alpha_{S,G} \cdot a_b \cdot V \cdot (T_E - T_S) + c_V \cdot r \cdot \dot{m}_m \quad (4.11)$$

при чему је:  $T_S(z,0) = T_{S,0}(z)$  за  $0 \leq z \leq h$  и где су:  $c_S = c_{S,d} + c_{m,L} \cdot X$  специфични топлотни капацитет влажних честица у суспензиониј фази, а  $\lambda_{eff} = D_{eff} \cdot c_S \cdot \rho_S$  је ефективна топлотна проводљивост.

Једначина континуитета за гасну фазу:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (m_G) + \frac{\partial}{\partial z} (v_G \cdot m_G) = \dot{m}_m \quad (4.12)$$

где су:  $m_G(0,\tau) = m_{G,in}$  и  $v_G(0,\tau) = v_{G,in}$  за  $\tau \geq 0$ .

Почетни масени проток гаса испред слоја се може поделити, сагласно двофазном моделу мехурастог флуидизованог слоја, на део гаса који протиче кроз мехурасту фазу ( $\dot{m}_B$ ) и део који протиче кроз суспензиону фазу ( $\dot{m}_E$ ):

$$\dot{m}_{G,in} = A \cdot \rho_{G,in} \cdot v_{G,in} = \dot{m}_B + \dot{m}_E = A \cdot f_B \cdot \rho_G \cdot v_{G,B} + A \cdot (1 - f_B) \cdot \rho_G \cdot v_{G,E} \quad (4.13)$$

где је брзина  $v_{G,in}$  брзина гаса у слободном пресеку ( $A$ ), а  $f_B$  је удео мехурасте фазе гаса у односу на укупну запремину гаса.

Брзина гаса кроз суспензиону фазу и брзина гаса кроз мехурасту фазу могу се добити на основу израза:  $v_{G,E} = v_{G,mf} / \psi_{mf}$  и  $v_{G,B} = v_{G,in} / f_B - v_{G,E} \cdot (1 - f_B) / f_B$ . Минимална брзина флуидизације  $v_{G,mf}$  је одређена на исти начин као за експериментална испитивања и детаљно приказана у поглављу 5.5.

Суспензиона фаза је у условима минималне флуидизације и може се апроксимирати насутим/непокретним слојем чија је порозност [68]

$$\psi_{mf} = 0,586 \cdot \phi_S^{-0,72} \cdot \left[ \frac{\eta_G^2}{\rho_G \times (\rho_S - \rho_G) \cdot g \cdot d_S^3} \right]^{0,029} \cdot \left( \frac{\rho_G}{\rho_S} \right)^{0,021} \quad (4.14)$$

Како се у случају флуидизованог слоја усваја као код непокретног да не постоји усмерено кретање чврстих честица, брзина честица је једнака нули,  $v_S = 0$ .

Коефицијент дисперзије честица се може израчунати на основу израза Kunii и Levenspiel-a [68]:

$$D_{eff} = \frac{k^2 \cdot \psi_{mf}}{3 \cdot f_B \cdot v_{G,mf}} \cdot d_B \cdot \psi_{mf} \cdot (v_{G,in} - v_{G,mf})^2 \quad (4.15)$$

где је  $d_B$  пречник мехура дефинисан као [75]

$$d_B = 0,54 \cdot (v_{G,in} - v_{G,mf})^{0,4} \cdot (h + 4 \cdot \sqrt{A_0})^{0,8} \cdot g^{-0,2} \quad (4.16)$$

а  $h$  је висина мехура (т.ј. попречни пресек слоја) у односу на улазну зону флуидизованог слоја, а  $A_0$  је попречни пресек отвора, који представља карактеристику дистрибутора протока.

Важно је напоменути, као закључак за поглавља 4.1 и 4.2, да се систем парцијалних диференцијалних једначина за случај конвективног сушења у непокретном слоју лако добити из већ приказаних једначина (4.6) - (4.12) за случај конвективног сушења у флуидизованом слоју, помоћу:

- 1) уклањањем једначина (4.6) и (4.9) који се односе на мехурасту фазу,
- 2) поједностављење једначина (4.7) и (4.10) брисањем "изворних чланова" који се односе на мехурасту фазу (садрже коефицијенте  $(K_{VE})_B$  и  $(H_{VE})_B$ ),
- 3) поједностављење једначина (4.8) и (4.11), брисањем "дифузионих чланова" (који садрже коефицијенте  $D_{eff}$ , т.ј.  $\lambda_{eff}$ ) због одсуства дисперзије честица у непокретном слоју.

#### 4.3 Изворни чланови

За дефинисање и израчунавање извора супстанције ( $\dot{m}_m$ ), који у случају конвективног сушења представља проток испарене влаге, користи се систем спрегнутих парцијалних диференцијалних једначина (4.1) - (4.5) и (4.6) - (4.12) заједно са једначином брзине сушења. За ову сврху је изабран концепт "коефицијента сушења", који се заснива на одвојеном разматрању транспортних феномена који се дешавају унутар и изван честице, а које узрокују две врсте отпора преноса супстанције који су присутни током конвективног сушења:

- унутрашњи отпор преноса влаге из унутрашњости на површину честице,
- отпор конвекцији влаге са површине честице у околни гас, т.ј. агенс сушења.

Пренос влаге из унутрашњости ка површини честице представља сложени механизам због тога што су укључује различите механизме преноса влаге (капиларност, дифузија, термодифузија, проток кроз гранични слој и кроз

непоремећену (од честица довољно удаљену) струју гаса, површинска дифузија) који зависе од структуре честица материјала који се суши.

Пренос влаге из унутрашњости на површину честице се може довољно тачно изразити помоћу емпиријске формуле:

$$\dot{m}_m = m_{S,d} \cdot k_i \cdot (X_{sf,eq} - X) \quad (4.17)$$

где су:  $k_i$  – коефицијент унутрашњег преноса влаге (који је претходно наведен као "коефицијент сушења"),  $X_{sf,eq}$  је садржај влаге на површини честице.

С друге стране, влага која је пренешена из унутрашњости на површину честице треба да се одведе у околни гас (агенс сушења). Претпоставља се да су површина честице и гас у њеној непосредној близини у стању хигроскопске равнотеже, па се проток паре (испарене влаге) може такође написати као:

$$\dot{m}_m = m_{G,d} \cdot \beta_{S,G} \cdot a_b \cdot (Y - Y_{eq}) \quad (4.18)$$

Пошто су једначине (4.17) и (4.18) повезане стањем равнотеже, морају се решавати истовремено. Непознате променљиве  $Y_{eq}$  и  $X_{sf,eq}$  (равнотежни садржај влаге у гасу и на површини честице) морају испуњавати услове хигроскопске равнотеже за одређене нивое влаге на површини честице. У случају који се овде разматра, наведени услов треба да буде испуњен за воду на површини честице угља. Емпиријски "коефицијент сушења" ( $k_i$ ) зависи од врсте материјала и мора бити одређен за сваки материјал који се суши. Са друге стране, коефицијент преноса супстанције са гасне стране ( $\beta_{S,G}$ ), може се одредити из општих једначина који не зависе од особина чврсте фазе.

Укупни коефицијент размене гаса између мехурасте и суспензионе фазе, који се заснива на запремини мехура, се одређује као [68]:

$$\frac{1}{(K_{VE})_V} = \frac{1}{(K_{VC})_V} + \frac{1}{(K_{CE})_V} \quad (4.19)$$

при чему су:

$$(K_{VC})_V = 4,5 \cdot \frac{v_{G,mf}}{d_B} + 5,85 \cdot \frac{\delta_V^{0,5} \cdot g^{0,25}}{d_B^{1,25}} \quad (4.20)$$

$$(K_{CE})_V = 6,78 \cdot \left( \frac{\psi_{mf} \cdot \delta_V \cdot v_{G,B}}{d_B^3} \right) \quad (4.21)$$

док је укупни запремински коефицијент преноса топлоте између мехурасте и суспензионе фазе, на основу запремине мехура [68]:

$$\frac{1}{(H_{VE})_V} = \frac{1}{(H_{VC})_V} + \frac{1}{(H_{CE})_V} \quad (4.22)$$

при чему су:

$$(H_{BC})_B = 4,5 \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot \frac{v_{G,mf}}{d_B} + 5,85 \cdot \frac{(\lambda_B \cdot \rho_B \cdot c_B)^{0,5} \cdot g^{0,25}}{d_B^{1,25}} \quad (4.23)$$

$$(H_{CE})_B = 6,78 \cdot (\lambda_B \cdot \rho_B \cdot c_B)^{0,5} \cdot \left(\frac{\psi_{mf} \cdot v_{G,B}}{d_B^3}\right)^{0,5} \quad (4.24)$$

#### 4.4 Дефинисање параметара

Због сложеног механизма везивања воде и честице, равнотежа између одређеног материјала и влажног ваздуха на одређеној температури (изотерма сорпције/десорпције) може да се утврди само експериментално, и обично је узајамна веза између параметара емпиријски одређена. За ову сврху, користиће се емпиријска корелација коју су предложили Стефановић и други аутори [76]:

$$1 - \varphi_{eq} = e^B \quad (4.25)$$

где су:

$$\varphi_{eq} = \frac{p_{bar}}{p_{ps}} \cdot \frac{Y_{eq}}{Y_{eq} + (1 - Y_{eq}) \cdot \frac{\bar{m}_V}{\bar{m}_G}} \quad (4.26)$$

$$B = B_0 \cdot T_S^a \cdot X_{eq}^b \quad (4.27)$$

са  $T_s$  израженом у К.

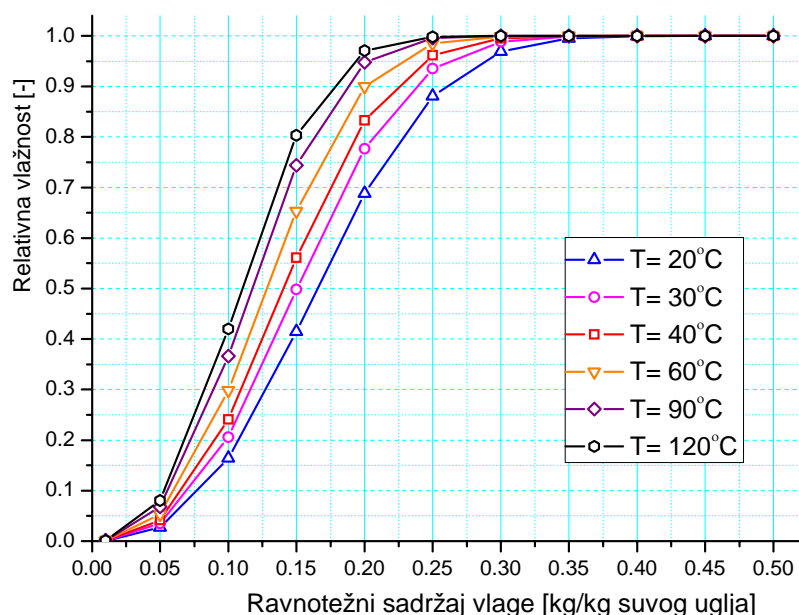
Исти аутори (Стефановић и други аутори [76]) су предложили израз за унутрашњи (у влажном материјалу) коефицијент преноса (транспорта) влаге ("коефицијент сушења")  $k_i$  у једначини (4.17) који представља укупни отпор преноса влаге у материјалу:

$$k_i = A_K \cdot d_S^{n_D} \cdot \frac{X}{X_0} \cdot T_S^{n_T} \quad (4.28)$$

где је  $T_s$  изражена у °С, а  $d_s$  у m.

Сви параметри у једначини (4.27) ( $B_0$ ,  $a$ ,  $b$ ) одређени су током прелиминарних истраживања [76], за исти лигнит Колубара, који се испитује у овој тези, коришћењем познате методе статичког уравнотежења која се примењује за мале узорке материјала у контакту са ваздухом чији је садржај влаге одређен равнотежним стањем са одговарајућим растворима соли. Добијени параметри су касније коришћени за дефинисање изотерми сорпције/десорпције, које су затим корелисане на основу једначине (4.25) и приказане су на слици 4.2. Експерименти

кинетику сушења који су урађени од стране истих аутора, су изведени у веома танким слојевима (само један или два слоја честица) који се састоје од честица угља пречника 5,1 mm и 20 mm са садржајем влаге од 0,02 kg/kg и 0,04 kg/kg, користећи ваздух на температурама између 60°C и 200°C и са брзинама протока 1 m/s и 2 m/s. На тај начин добијени параметри се могу сматрати непроменљивим при протицању ваздуха кроз описане танке слојеве, чиме се омогућава да се параметри у једначини (4.28) ( $A_k$ ,  $n_D$ ,  $n_T$ ) изведу директно (поређено са Hirschmann [77]). Сви параметри специфични за влажан материјал, на основу којих је могуће дефинисати хигроскопност и кинетику сушења условљену процесима унутар влажног материјала, односно честица угља, су сумирани у Табели 4.1.



Слика 4.2 Изотерме десорпције за лигнит Колубара

Табела 4.1 Параметри сорпције равнотеже (j-на (4.27)) и кинетика сушења (j-на (4.28)) за лигнит Колубара [76]

Кинетика			Равнотежа		
$A_k$ према j-ни (4.28)	$n_D$	$n_T$	$B_0$ према j-ни (4.27)	$a$	$b$
0,0005	-1,2	3,3	14,027	0,62	2,7

За разлику од претходно поменутих коефицијената, коефицијенти преноса топлоте и супстанције који описују појаве које се јављају између површине честица и гаса у непокретном слоју (такође, суспензиона фаза у флуидизованом

слоју),  $\alpha_{S,G}$  и  $\beta_{S,G}$ , не зависе од унутрашње структура материјала. Како се може видети у литератури, поменути коефицијенти су опсежно истраживани и изражени преко уопштених бездимензионих корелација/израза. Да би се дефинисали поменути изрази потребно је размотрити карактеристике транспорта (топлоте, односно супстанције), што је тема наредног поглавља.

#### 4.5 Транспортне карактеристике

##### 4.5.1 Топлотна проводљивост кроз непокретни слој

Ефективна топлотна проводљивост насутог/непокретног слоја ( $\lambda_b$ ), за јединичну ћелију приказану на слици 4.3, може се доследно дефинисати на основу модела Zehner, Bauer и Schlünder –а [78]:

$$k_b = \frac{\lambda_b}{\lambda_F} \quad (4.29)$$

$$k_b = 1 - \sqrt{1 - \psi} + \sqrt{1 - \psi} \cdot k_C \quad (4.30)$$

где је:

$$k_C = \frac{2}{N} \cdot \left( \frac{B}{N^2} \cdot \frac{k_S - 1}{k_S} \cdot \ln \frac{k_S}{B} - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{N} \right) \quad (4.31)$$

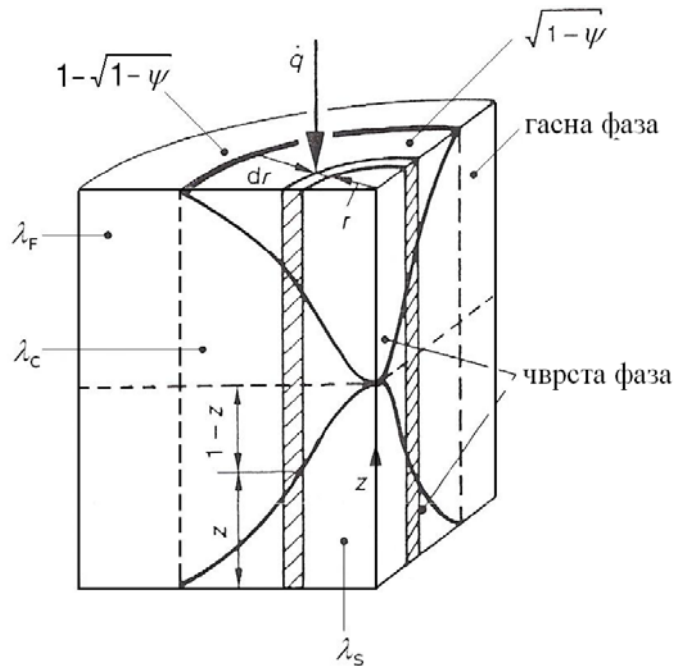
$$B = 1,25 \cdot \left( \frac{1-\psi}{\psi} \right)^{10/9} \quad (4.32)$$

$$N = 1 - \frac{B}{k_S} \quad (4.33)$$

$$k_S = \frac{\lambda_S}{\lambda_F} \quad (4.34)$$

где су  $\psi$  порозност насутог/непокретног слоја, а  $\lambda_S$  и  $\lambda_F$  су топлотне проводљивости чврстих честица и флуида.

Ефективна топлотна проводљивост насутог/непокретног слоја ( $\lambda_b$ ) може да се користи за дефинисање механизма преноса/транспорта топлоте који се јављају у насutom/непокретном слоју.



Слика 4.3 Јединична ћелија модела Zehner, Bauer и Schlünder -а

#### 4.5.2 Преовлађујући механизам преноса топлоте

Простирање топлоте у порозној средини (т.ј. насутом/непокретном слоју) је у општем смислу под утицајем следећих међусобно допуњујућих механизма [79].

1 – Аксијални пренос топлоте ( $A_1$ )

$$A_1 = \frac{(1+K^*)^2}{Pe_S} \cdot \frac{\lambda_{ax}}{\lambda_F} \quad (4.35)$$

$$\frac{\lambda_{ax}}{\lambda_F} = \frac{\lambda_b}{\lambda_F} \cdot \frac{Pe_S}{2} \quad (4.36)$$

$$K^* = \frac{(1-\psi) \cdot (\rho c)_S}{\psi \cdot (\rho c)_F} \quad (4.37)$$

$$Pe_S = \frac{v_{G,in} \cdot (\rho c)_F \cdot d_S}{\lambda_F} \quad (4.38)$$

где су:  $\lambda_{ax}$  – топлотна проводњивост у аксијалном смеру протока гаса,  $\rho$  и  $c$  у  $(\rho c)_F$  и  $(\rho c)_S$  представљају густину и специфични топлотни капацитет гаса и честица,  $d_S$  је еквивалентни пречник честица материјала који се суши, а  $Pe_S$  је Peclet – ов критеријум.

2 – Пренос топлоте између гаса и честица ( $A_2$ )

$$A_2 = \frac{K^{*2} \cdot Pe_S}{Nu_S \cdot a_b \cdot d_S} \quad (4.39)$$



где је  $a_b$  специфична површина слоја и Nusselt-ов критеријум који се може добити на основу следећих израза [80].

$$Nu_S = 2 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (4.40)$$

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{Re_S} \quad (4.41)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re_S^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_S^{-0,1} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (4.42)$$

3 – Пренос топлоте кроз честицу ( $A_3$ )

$$A_3 = \frac{K^{*2} \cdot Pe_S}{60 \cdot (1 - \psi) \cdot \frac{\lambda_S}{\lambda_F}} \quad (4.43)$$

Погодно је да се претходно описани ефекти преноса топлоте обједине дефинисањем еквивалентног Nusselt-овог критеријума:

$$Nu_{S^*} = \frac{K^{*2} \cdot Pe_S}{(A_1 + A_2 + A_3) \cdot a_b \cdot d_S} \quad (4.44)$$

У складу са ранијим објашњењима, коефицијент преноса топлоте између гаса и честица ( $\alpha_{S,G}$ ) се израчунава из следећег израза:

$$\alpha_{S,G} = \frac{Nu_{S^*} \cdot \lambda_G}{d_S} \quad (4.45)$$

Дефиниције механизма преноса супстанције су, на основу познате аналогije преноса топлоте и супстанције, сличне онима који описују механизме преноса топлоте, али су одређене одговарајућим ефективним коефицијентом дифузије ( $\delta_{eff}$ ), и "молекуларним" Péclet-ов критеријумом  $Pe_S^D = v_{G,in} \cdot d_S / \delta_{eff}$ . На пример, аксијална дисперзија масе ( $D_{ax}$ ) се добија из следећег израза:

$$\frac{D_{ax}}{\delta} = \frac{\delta_{eff}}{\delta} + \frac{Pe_S^D}{2} \quad (4.46)$$

#### 4.6 Нумеричко решавање диференцијалних једначина

Општи облик диференцијалних једначина које описују принцип одржања опште зависно променљиве величине ( $\Phi$ ), у случају нестационарног проблема, приказана је једначином 3.1. За једначину континуитета важи да је  $\Phi = 1$  и  $\Gamma_\Phi = 0$ .

Поље брзина мора да задовољи допунско ограничење у облику закона о одржању супстанције или једначине континуитета:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = S_m \quad (4.47)$$

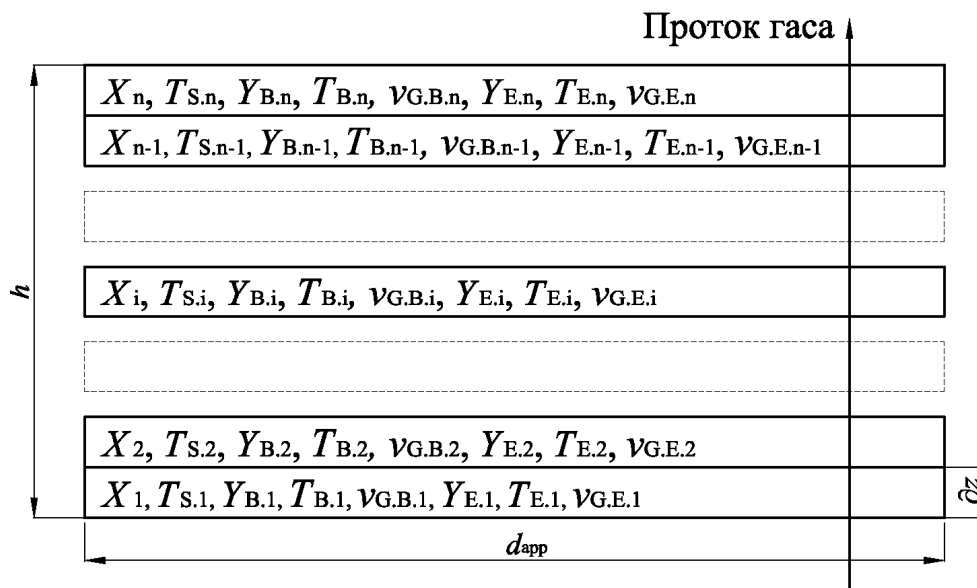
где  $S_m$  представља извор или понор супстанције, т.ј. масени проток испарене влаге ( $\dot{m}_m$ ).

За случај нестационарног једнодимензијског проблема једначине (3.1) и (4.47) се пишу у следећем облику:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \cdot \Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot v \cdot \Phi) = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\Phi \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial z}) + S_\Phi \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot v) = S_m \quad (4.49)$$

Парцијалне диференцијалне једначине су решаване нумеричким поступком који је заснован на методи коју је развио Патанкар [69]. Једначине (4.1) до (4.5) и (4.6) до (4.12) се дискретизују методом контролне запремине, т.ј. непокретног слоја, док је флуидизовани слој подељен у коначном броју контролних запремина (са елементарним слојем) коришћењем вертикалне мреже, као што приказано на слици 4.4.

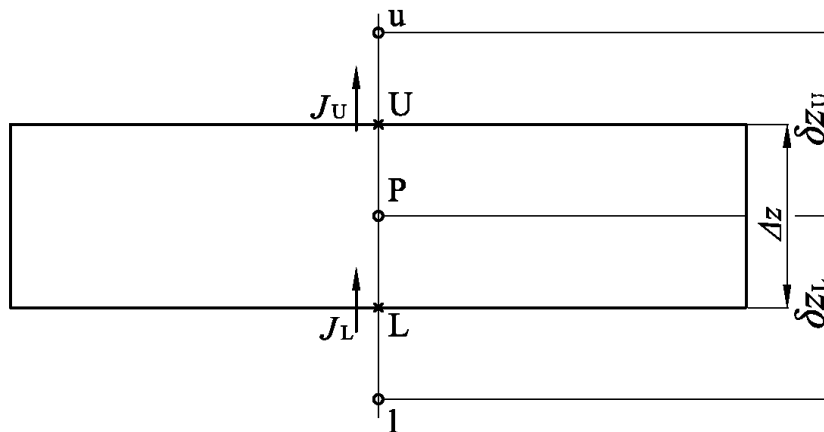


Слика 4.4 Основне променљиве величине и поступак дискретизације по висини флуидизованог слоја

Контролна запремина која се, у случају једнодимензијског нестационарног проблема, може свести на контролну површину чија је једна димензија непромењена (представља ширину струјног простора), па се још прецизније може

сматрати контролном дужи, приказана је на слици 4.5. Граница струјног простора се поклапа са бочним линијама контролне површине. Словом "P" је означена произвољна контролна површина. Суседна контролна површина изнад је означена са "u" (горња – upper), а суседна контролна површина испод је означена са "l" (доња – lower). Садржаји влаге и енталпије гаса и честица се израчунавају у тачкама означеним кружићима (тачке "u", "P" и "l").

Контролне површине за брзине су померене тако да се брзине рачунају на границама контролне површине за једначину континуитета и диференцијалне једначине одржања садржаја влаге и енталпија гаса и честица у тачки означеној "x" (тачка L) која се налази на половини растојања између тачака l и P. На овај начин није потребно вршити интерполацију при рачунању конвективних флукса.



Слика 4.5 Контролна површина за општу променљиву

Интеграцијом једначине одржања супстанције по контролној запремини "P", за нестационарно једнодимензионо струјно поље, и по временском интервалу од  $\tau$  до  $\tau + \Delta\tau$ , применом потпуне имплицитне шеме [69] добија се

$$(\rho_P - \rho_P^0) \cdot \frac{\Delta z}{\Delta \tau} + \dot{m}_U - \dot{m}_L - S_m \cdot \Delta z = 0 \quad (4.50)$$

Масени протоци  $\dot{m}_U$  и  $\dot{m}_L$  кроз граничне линије контролне површине се израчунавају на следећи начин:

$$\dot{m}_U = \rho_U \cdot v_U \cdot A_U \quad (4.51)$$

$$\dot{m}_L = \rho_L \cdot v_L \cdot A_L \quad (4.52)$$

У једначини (4.50)  $S_m^P = S_m \cdot \Delta z$  означава извор или понор супстанције у контролној површини који настаје услед размене влаге између честица и гаса. Постојање извора супстанције уноси извесне измене у поступак дискретизације једначине и погодно га је узети у обзир у једначини континуитета. За дати нумерички поступак претпоставља се да су вредности брзина на границама контролних површина константне. Постављањем веома грубе мреже могу настати грешке, али се при нумеричком решавању диференцијалних једначина овакве апроксимације врло тешко могу избећи.

Диференцијална једначина за општу променљиву  $\Phi = \Phi(z, \tau)$ , написана за једнодимензиони нестационарни проблем, има облик једначине (4.48), а укупан флуks променљиве величине  $\Phi$  кроз контролну површину, за одређени тренутак времена, једнак је збиру конвекције и дифузије:

$$J_\Phi = \rho \cdot v \cdot \Phi - \Gamma_\Phi \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (4.53)$$

Увођењем густине флуksа у диференцијалну једначину (4.48) добија се:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \cdot \Phi) + \frac{\partial J_\Phi}{\partial z} = S_\Phi \quad (4.54)$$

Интеграцијом једначине (4.54) по контролној запремини, односно по јединичној дужи (јер је  $\Delta V = I \cdot \Delta z$ ) и по временском интервалу од  $\tau$  до  $\tau + \Delta \tau$ , применом потпуне имплицитне шеме [69], добија се одговарајућа дискретизациона једначина:

$$(\rho_P \cdot \Phi_P - \rho_P^0 \cdot \Phi_P^0) \times \frac{\Delta z}{\Delta \tau} + J_U - J_L = S_\Phi \cdot \Delta z \quad (4.55)$$

Извор  $S_\Phi$  је функција опште променљиве  $\Phi$ . Систем спрегнутих једначина је нелинеаран и не може се директно решавати, па се користи итеративни поступак решавања у коме се извор линеаризује у облику [69]:

$$S_\Phi = S_C + S_P \cdot \Phi_P \quad (4.56)$$

Коефицијенти  $S_C$  и  $S_P$  могу зависити од свих променљивих у струјном простору. У свакој итерацији се рачунају на основу вредности променљивих из претходне итерације.

Када се једначина континуитета (4.50) помножи вредношћу опште променљиве  $\Phi$  у тачки "P" ( $\Phi_P$ ) и одузме од једначине (4.55) добија се:

$$\rho_P^0 \cdot (\Phi_P - \Phi_P^0) \cdot \frac{\Delta z}{\Delta \tau} + (J_U - \dot{m}_U \cdot \Phi_P) - (J_L - \dot{m}_L \cdot \Phi_P) =$$

$$= (S_C + S_P \cdot \Phi_P - S_m \cdot \Phi_P) \cdot \Delta z \quad (4.57)$$

Последњи члан на десној страни једначине потиче од новостворене масе флуида и мора се укључити у први или други члан на истој страни ( $S_P^* = S_P - S_m$ ) чиме извор задржава претходни облик према једначини (4.56). Други и трећи члан на левој страни једначине (4.58) се могу написати на следећи начин:

$$(J_U - \dot{m}_U \cdot \Phi_P) = a_U \cdot (\Phi_P - \Phi_U) \quad (4.58)$$

$$(J_L - \dot{m}_L \cdot \Phi_P) = a_L \cdot (\Phi_L - \Phi_P) \quad (4.59)$$

За потребе дискретизације израз у првом члану на левој страни једначине (4.57) се може написати на следећи начин:

$$\rho_P^0 \cdot \frac{\Delta z}{\Delta \tau} = a_P^0 \quad (4.60)$$

тако да се једначина (4.57) дискретизује у следећем облику:

$$a_P \cdot \Phi_P = a_U \cdot \Phi_U + a_L \cdot \Phi_L + b_P \quad (4.61)$$

$$\text{где је: } a_P = a_U + a_L + a_P^0 - S_P^* \cdot \Delta z, \quad b_P = a_P^0 \cdot \Phi_P^0 + S_C \cdot \Delta z \quad (4.62)$$

Коефицијенти  $a_U$  и  $a_L$  зависе од интензитета конвекције ( $F = \rho \cdot v$ ) и проводности дифузије ( $D = \Gamma / \delta z$ ) између суседних тачака нумеричке мреже. За једнодимензиону конвекцију и дифузију између тачке "P" и суседних тачака "u" и "l" постоји егзактно решење ових зависности [69], које у бездимензионом облику гласи:

$$\frac{a_U}{D_U} = \frac{P_U}{\exp(P_U) - 1}, \quad \frac{a_L}{D_L} = \frac{P_L \cdot \exp(P_L)}{\exp(P_L) - 1} \quad (4.63)$$

где су  $P_U$  и  $P_L$  Peclet-ови критеријуми:

$$P_U = \frac{\dot{m}_U}{D_U}, \quad P_L = \frac{\dot{m}_L}{D_L} \quad (4.64)$$

а коефицијенти дифузије на горњој граници  $D_U$  и доњој граници  $D_L$  контролне површине се израчунавају на основу израза:

$$D_U = \frac{\Gamma_U}{\delta z_U}, \quad D_L = \frac{\Gamma_L}{\delta z_L} \quad (4.65)$$

Примена егзактног решења се препоручује само за једнодимензиону конвекцију и дифузију, док се за остале случајеве користе шеме које представљају апроксимацију егзактног решења [69].

При решавању једначина облика (4.61) ни један од коефицијената  $a_U$ ,  $a_P$  и  $a_L$  не сме бити негативан да би се добило физички реално решење[69].

Описаном дискретизацијом се добија систем линеаризованих алгебарских једначина које се за сваку променљиву решавају итеративним поступком због нелинеарности полазних једначина. Итеративни поступак који се користи назива се "линија по линија". У једној итерацији једначине се решавају редом за сваку променљиву, а чланови преко којих се остварује њихова спрега израчунавају се на основу вредности променљивих добијених у текућој итерацији. Исти поступак се спроводи за сваку линију (елементарни слој) у једном смеру. Овај метод, назван по научнику Llewellyn Hilleth Thomas-у Томас алгоритам или TDMA алгоритам (Tri Diagonal-Matrix Algorithm), је поједностављена форма Gauss-ове методе елиминације дуж једне линије, који се може користити у решавању тридијагоналних система једначина.

Поступак прорачуна почиње од прве контролне запремине и наставља се суседном контролном запремином, посматрајући у правцу протока гаса (аксијалном правцу слоја), али тек ако су испуњени предуслови равнотеже, који су дефинисани једначинама (4.1) - (4.5) и (4.6) - (4.12). Чињеница да нема кретања честица материјала унутар непокретног и флуидизованог слоја ( $v_s = 0$ ), односно, одсуство "конвекционих чланова" у једначинама (4.3), (4.6), (4.8) и (4.11), не утиче на израчунавање зависно променљивих садржаја воде и енталпије честица, али ствара неке нумеричке проблеме у вези конвергенције решења. Јављају се два супротна захтева у исто време. Потребно је с једне стране пригушити осцилације добијених вредности променљивих у свакој итерацији, а са друге стране решење треба добити са што мањим бројем итерација.

Најпогоднији критеријум конвергенције је провера колико добро су дискретизационе једначине задовољене вредностима променљивих добијених у текућој итерацији за сваку контролну запремину. Провера се врши на основу познатих коефицијената у дискретизационој једначини. За сваку променљиву  $\Phi$  одређује се резидуал:

$$R = \sum a_i \cdot \Phi_i + S_C - a_P \cdot \Phi_P \quad (4.66)$$

Када је резидуал једнак нули решење је тачно и дискретизациона једначина је задовољена. Да би се постигло да резидуал буде једнак нули потребно је дуго време рачунања што је непрактично. Зато се задаје довољно мала вредност уместо нуле тако да се прорачун прекида оног тренутка када је испуњен услов да је

апсолутна вредност резидуала мања од ње. Нешто веће смањење времена за прорачун је постигнуто релативизацијом резидуала када је постављен услов да је за задовољавајућу тачност решења система једначина довољно да релативни резидуали буду мањи од неке претходно изабране мале вредности (0,5%).

Релативизација резидуала за енталпије (температуре) гаса у мехурастој фази, гаса у суспензионој фази и честица у суспензионој фази се врши дељењем суме апсолутних вредности резидуала у свим контролним запреминама са одговарајућим вредностима енталпија на уласку у слој материјала за одређени временски корак:

$$R_{T_B} = \frac{\sum |R|_{T_B}}{I_{1B}}, \quad R_{T_E} = \frac{\sum |R|_{T_E}}{I_{1E}}, \quad R_{T_S} = \frac{\sum |R|_{T_S}}{I_{1S}} \quad (4.67)$$

Релативни резидуал за садржаје влаге гаса у мехурастој фази, гаса у суспензионој фази и честица у суспензионој фази се добија када се сума апсолутних вредности резидуала једначина за одржање садржаја влаге у свим контролним запреминама подели са одговарајућим садржајима влаге на почетку процеса сушења:

$$R_{Y_B} = \frac{\sum |R|_{Y_B}}{Y_{1B}}, \quad R_{Y_E} = \frac{\sum |R|_{Y_E}}{Y_{1E}}, \quad R_{T_S} = \frac{\sum |R|_X}{X_1} \quad (4.68)$$

Да би се спречила дивергенција решења неопходно је обезбедити релативно благе промене вредности променљивих од итерације до итерације. За то се користи метод "подрелаксације" који подразумева да се током итеративног поступка користе вредности зависно променљивих које су комбинација вредности добијених током текуће ( $\Phi_n$ ) и претходне ( $\Phi_{n-1}$ ) итерације [69]:

$$\Phi = a_{ur} \cdot \Phi_n + (1 - a_{ur}) \cdot \Phi_{n-1} \quad (4.69)$$

где је  $a_{ur}$  подрелаксациони фактор чија се вредност задаје у границама од 0 до 1.

Такође, претпостављене вредности променљивих величина на почетку прорачуна процеса сушења имају велики утицај на конвергенцију, т.ј. време трајања прорачуна.

### 4.7 Алгоритам прорачуна и програм

Алгоритам прорачуна је приказан на слици 4.6. За потребе прорачуна коришћен је програмски језик FORTRAN. Прорачун се врши у више корака (поступака), који се могу дефинисати на следећи начин.

Први корак представља припрему за израчунавање:

- преузимање почетних вредности константи из улазних датотека,
- дефинисање параметара материјала који се суши и агенса сушења,
- дефинисање врсте слоја материјала и његових карактеристика,
- дефинисање нумеричке мреже, дужине трајања временског корака и укупно време трајања процеса сушења, односно укупан број корака,
- задавање параметара за контролу извршења програма,
- дефинисање граничних услова и почетних вредности променљивих.

Позивањем подпрограма INIT CALC израчунавају се геометријске карактеристике слоја и задају почетне вредности свих променљивих. Након тога, у излазну датотеку се уписују подаци о почетним и граничним условима. После описаних припремних израчунавања, програм прелази на израчунавање променљивих величина по висини слоја за први временски корак.

Други корак представља позивање подпрограма AIR PROPS у коме се израчунавају физичке карактеристике агенса сушења.

У трећем кораку се израчунавају одговарајуће брзине струјања гаса у суспензионој и мехурастој фази позивањем подпрограма CALC RATE. Поред брзина струјања гаса рачунају се и корекције брзине услед постојања извора супстанције, односно влаге/паре.

У четвртном кораку се помоћу програма CALC COEF рачунају сви потребни коефицијенти за сваку контролну запремину:  $a_b$ ,  $(H_{be})_b$ ,  $\alpha_{S,G}$ ,  $(K_{be})_b$ ,  $\beta_{S,G}$ ,  $D_{eff}$ . Позивањем посебних функција унутар овог подпрограма за израчунавање:  $\varphi_{eq}$ ,  $X_{sf,eq}$  и  $k_i$  одређује се брзина сушења материјала.

У петом кораку се врши позивање подпрограма CALC MGBPH, CALC MGEPH, CALC MSEPH, CALC TGBPH, CALC TGEPH и CALC TSEPH и врши израчунавање зависно променљивих  $Y_B$ ,  $Y_E$ ,  $X$ ,  $T_B$ ,  $T_E$  и  $T_S$ . За решавање система алгебарских једначина у сваком од ових програма се у току извршења позива и



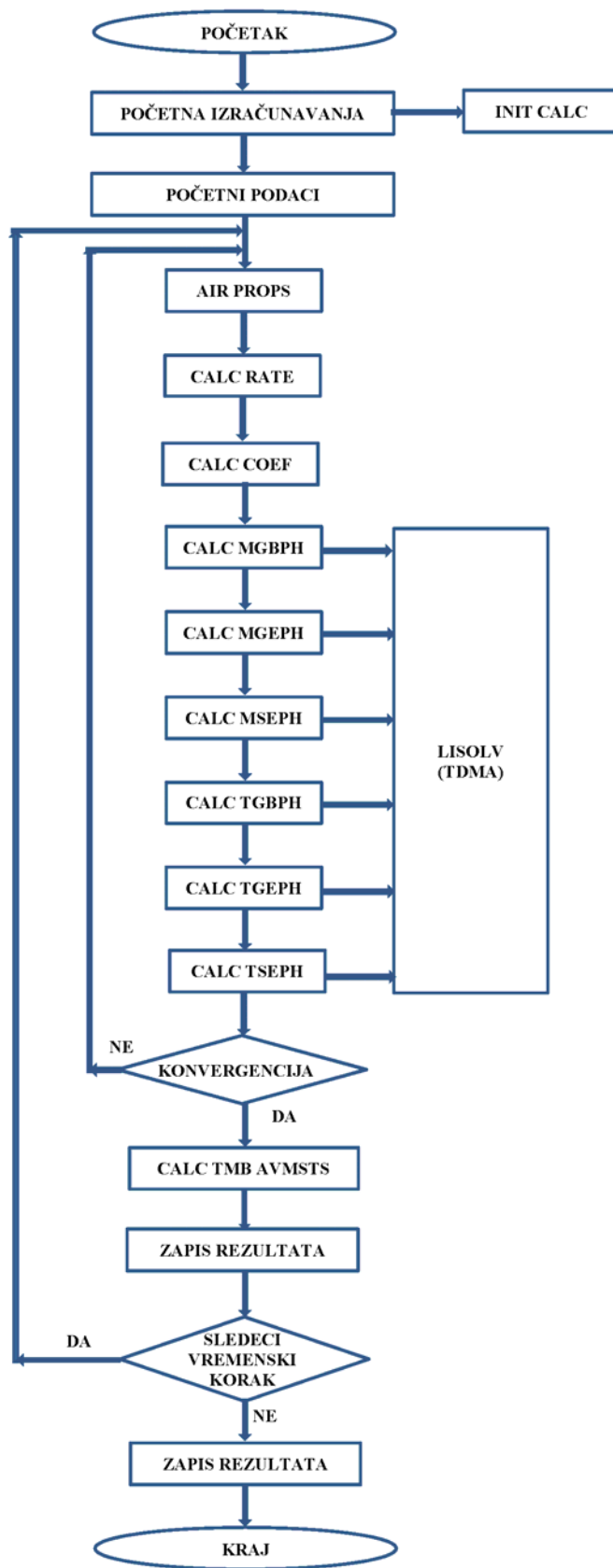
користи подпрограм LISOLV, у коме се користе метод линија по линија и три дијагонални матрични алгоритам (TDMA). Пошто је овај метод приближан, подпрограм LISOLV се позива два до три пута за израчунавање истих коефицијената да би се постигла што тачнија привремена решења. Већ у следећој итерацији ово решење ће бити нешто другачије због измењених коефицијената. Ово се ради из разлога што је рачунање коефицијената дуготрајно, па се коефицијенти израчунати у свакој итерацији морају користити у циљу приближавања конвергентном решењу.

У следећем кораку се проверава конвергенција решења. Уколико претходно задати услови конвергенције нису задовољени програм се враћа на други корак и врши поновни поступак по свим корацима. Број потребних итерација за постизање конвергентног решења треба да буде такав да дужина трајања поступка прорачуна не буде превелика што се одређује задатом класом тачности добијених резултата.

Када се постигне конвергентно решење у подпрограму CALC TMB AVMSTS се израчунавају биланси топлоте и супстанције и средње вредности за величине  $X$  и  $T_s$  на крају сваког одговарајућег временског интервала. Добијени подаци се уписују у излазну датотеку.

Након завршетка прорачуна за један временски корак прелази се на прорачун за следећи временски корак. То се врши тако што се програм враћа на други корак у коме се позива подпрограм AIR PROPS. Такође, ограничава се и број временских корака, односно укупно време.

Када се достигне највећи задати број временског корака или задати најмањи садржај влаге материјала поступак прорачуна се зауставља. Добијени излазни подаци се уписују у излазну датотеку.



Слика 4.6 Алгоритам прорачуна

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ПРОЦЕСА СУШЕЊА УГЉА

Експериментална истраживања процеса конвективног сушења лигнита Колубара у непокретном/насутом и флуидизованом слоју имају следеће циљеве:

- одређивање криве кинетике сушења лигнита Колубара,
- анализа процеса сушења и утицаја агенса сушења (топао ваздух),
- одређивање утицаја параметара агенса сушења (температура, проток),
- одређивање утицаја параметара материјала (величина честица),
- валидација математичког модела.

Одређивање промене садржаја воде у лигниту Колубара по сувој основи материјала (апсолутне влажности лигнита) извршиће се билансом масеног протока ваздуха на улазу и излазу из апаратуре на основу мерења протока, температуре и релативне влажности ваздуха на улазу и излазу из експерименталне апаратуре.

### 5.1 Опис експерименталне инсталације

Експериментално испитивање процеса сушења узорка лигнита Колубара у непокретном и флуидизованом слоју извршено је на апаратури Sherwood Tornado M501 Fluid Bed Dryer са посудом за постављање узорка запремине 5 литара, слика 5.1. Апаратура је купљена преко Јединице за управљање опремом (ЈУП) за извођење експеримената за потребе пројекта "Побољшање квалитета и технологије сагоревања домаћих лигнита у циљу повећања енергетске ефикасности и смањење емисије штетних материја из термоелектрана ЈП Електропривреда Србије (евиденциони број пројекта ТР-33050)". Шематски приказ апаратуре је дат на слици 5.1.б.

Апаратура садржи вентилатор, грејач ваздуха, термоелемент за мерење температуре, стаклену посуду са пластичним кућиштем, сонду за мерење воде и температуре и управљачку јединицу помоћу које се могу подешавати проток ваздуха, температура ваздуха испред узорка и дужина трајања експеримента. Може се користити као самостална јединица или се експериментом може

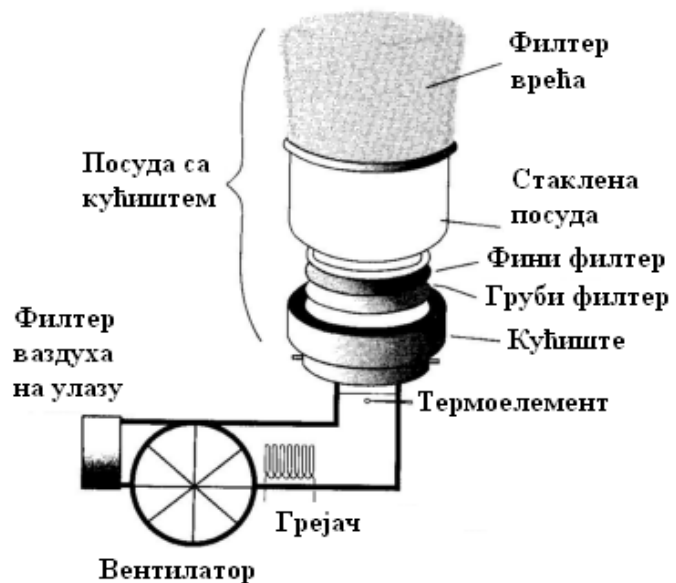
## 5. Експериментално испитивање процеса сушења

управљати, вршити надзор и записивање одређених измерених величина рачунаром помоћу програма "Fluid Bed Dryer Controller". Врши се запис оптерећења вентилатора, температуре ваздуха испред узорка и температуре ваздуха и релативне влажности ваздуха код сонде, на излазу из апаратуре.

На улазу, у задњем делу апаратуре, налази се филтер од нерђајућег челика. Ваздух се усисава у апаратуру помоћу центрифугалног вентилатора и преструјава преко грејача ваздуха електричне снаге 2 kW. Вентилатором ваздуха се управља и врши контрола помоћу тиристорског кола тако да се брзина мотора може подешавати у широком опсегу. Код модела М501, постоји повратна спрега која осигурава да се мотор вентилатора одржава на истој брзини без обзира на утицаје напајања и грејања. Проток ваздуха на излазу је калибрисан од стране произвођача током производње апаратуре, слика 5.2. Предвиђени радни проток је од 0 до 2 m<sup>3</sup>/min за опсег оптерећења вентилатора од 0 до 100%, док се највише може остварити 2,5 m<sup>3</sup>/min (127% подешено оптерећење вентилатора).

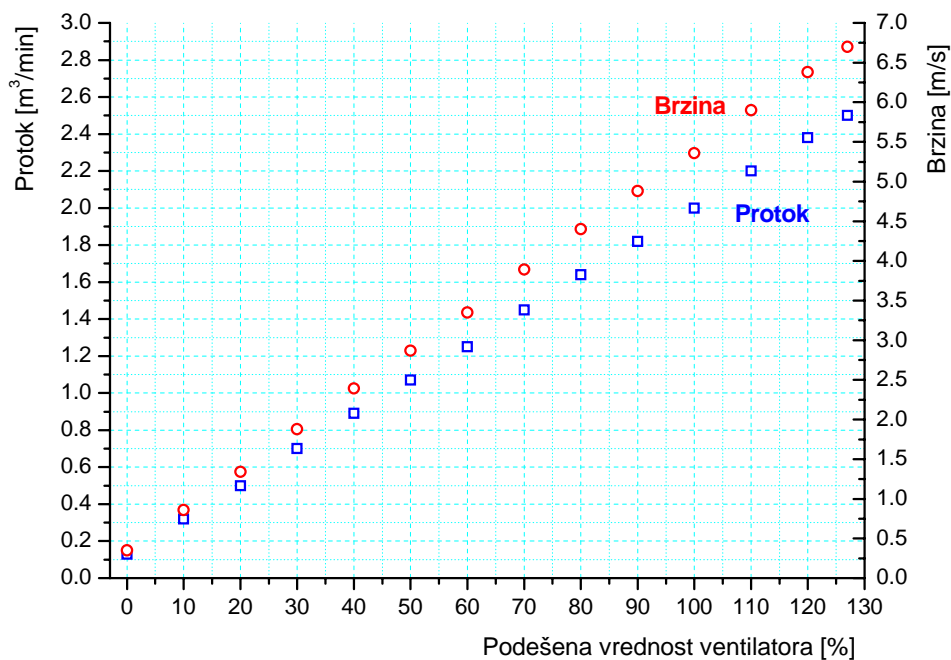


а) фотографија апаратуре



б) шематски приказ апаратуре

Слика 5.1 Апаратура за испитивање процеса сушења Sherwood Tornado M501



Слика 5.2 Калибрационе криве произвођача опреме за проток и брзину на излазу

Температура ваздуха иза загрејача се мери термопаром који је повезан са управљачком јединицом која укључује и искључује грејач према потреби, а на основу задате температуре ваздуха на улазу испред узорка. Температура ваздуха испред узорка се може подешавати у опсегу од 20 до 200°C. На задатим температурама ваздуха испред узорка изнад 150°C, при већим протоцима ваздуха, тешко се постиже константна температура ваздуха испред узорка, што значајно може да утиче на квалитет добијених резултата.

Ваздух пролази кроз носач филтера, односно грубљи филтер од нерђајућег челика који је постављен и затегнут у кућишту на дну стаклене цеви и који може да издржи масу узорка да не пропадне у апаратуру и падне на грејач. У кућиште од пластике, на носач филтера је постављен фини тефлонски филтер. За потребе извођења експеримената са узорцима угља са финијом гранулацијом постављен је филтер од 45  $\mu\text{m}$ . За кућиште је причвршћена и стаклена посуда од пет литара са горње стране, у коју се сипа узорак. Тако постављен цео склоп се поставља на апаратуру са горње стране помоћу брзе спојке – "бајонета".

На горњи део стаклене посуде поставља се врећасти филтер који се помоћу ластиша причвршћује за проширење на крају стаклене посуде. Са бочне стране

стаклене посуде налази се посебан отвор са навојем у који се поставља и причвршћује сонда за мерење влаге и температуре.

### 5.2 Мерење протока ваздуха и одређивање брзине ваздуха

Пошто је мерење протока једна од најважнијих мерних величина и како произвођач опреме нема прецизно дефинисану калибрациону криву за различите врсте и количине материја, апаратура је надограђена са додатном опремом за мерење протока ваздуха, слика 5.3. На улаз у апаратуру постављена је мерна бленда са усисном цеви према стандардима SRPS EN ISO 5167-1:2012 и SRPS EN ISO 5167-2:2012 "Мерење протока флуида помоћу уређаја са диференцијалним притиском уграђених у цевоводе кружног попречног притиска", Део 1: "Општи принципи и захтеви" и Део 2: "Мерне бленде".

Мерење протока се врши тако што се мерна бленда угради у цевовод кроз који ваздух струји пуним пресеком. Уграђена мерна бленда ствара разлику притисака испред и иза мерне бленде. Пречник отвора пригушне плоче је 25mm, а унутрашњи пречник цеви у коју је бленда уграђена је 55mm. Проток се израчунава према измереној вредности разлике притисака и познатим карактеристикама ваздуха на месту на коме се мери.



Слика 5.3 Експериментална апаратура са уграђеном мерном блендом

Масени проток ваздуха кроз мерну бленду у зависности од разлике притисака испред и иза мерне бленде се може изразити следећим једначинама на основу једначина из стандарда SRPS EN ISO 5167-1:2012 и SRPS EN ISO 5167-2:2012:

$$\dot{m}_{op} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2\Delta p_{G,op} \cdot \rho_{Gw,op}} \quad (5.1),$$

или:

$$\dot{m}_{op} = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2\Delta p_{G,op} \cdot \rho_{Gw,op}} \quad (5.2).$$

У стандарду нису дефинисане једначине за густину ваздуха и притисак сувозасићене водене паре у влажном ваздуху. Израчунавање густине преузето је из [81]:

$$\rho_{Gw,op} = \frac{1}{287,1} \cdot \left( \frac{p_{bar} + p_{G,st,op}}{273 + T_{G,op}} \right) - \left( \frac{1}{287,1} - \frac{1}{461,5} \right) \cdot \frac{\varphi_{op}}{100} \cdot \frac{p_{ps,op}}{273 + T_{G,op}} \quad (5.3).$$

Једначина за притисак сувозасићене водене паре у влажном ваздуху код мерне бленде за измерену температуру преузета је из инжењерског приричника [82]:

$$p_{ps,op} = e^{\left( \frac{77,3450 + 0,0057 \cdot (273 + T_{G,op}) - \frac{7235}{273 + T_{G,op}}}{(273 + T_{G,op})^{8,2}} \right)} \quad (5.4).$$

Запремински проток ваздуха кроз мерну бленду се израчунава према обрасцу:

$$\dot{V}_{op} = \dot{m}_{op} / \rho_{Gw,op} \quad (5.5).$$

Фактор експанзије  $\varepsilon$  се рачуна на следећи начин:

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \frac{\Delta p_{G,op}}{\kappa \cdot p_{G,op}} \quad (5.6),$$

док се фактор утицаја узводне брзине  $E$  рачуна на основу односа пречника  $\beta = d_{op} / D_{op}$ :

$$E = (1 - \beta^4)^{-1/2} = \frac{D_{op}^2}{(D_{op}^4 - d_{op}^4)^{1/2}} \quad (5.7)$$

Фактор протока и истицања  $\alpha$  и фактор истицања  $C$  се узимају из одговарајућих таблица у стандарду на основу Рејнолдсовог броја, који је за узводно стање ваздуха и узводни пречник:

$$R_{eD} = \frac{v_{G,op} \cdot D_{op}}{\nu_{op}} \quad (5.8)$$

док кроз грло бленде Рејнолдсов број износи:

$$R_{ed} = \frac{R_{eD}}{\beta} \quad (5.9)$$

Мерење диференцијалног и статичког притиска ваздуха на мерној бленди извршено је помоћу два дигитална микроманометра AlnorAXD 560, чији је радни

опсег  $\pm 3700$  Pa и резолуција 1 Pa. Температура ваздуха је мерена помоћу термопара типа K и дигиталног термометра Testo 925 (опсег мерења од  $-50$  до  $1000^{\circ}\text{C}$ , резолуција инструмента је  $0,1^{\circ}\text{C}$  за мерни опсег од  $-50$  до  $200^{\circ}\text{C}$ ), док је релативна влажност ваздуха испред мерне бленде мерена влагомером Testo 175-H2 са мерним опсегом од 0 до 100% и резолуцијом од 0,1%. За мерење барометарског притиска коришћен је дигитални барометар DB3 PCE Instruments (опсег мерења од 0 до 2000 mbar апсолутно, резолуција инструмента је 0,1 mbar). Сви напред наведени инструменти (слика 5.4) су еталонирани у овлашћеним лабораторијама за еталонирање од стране Акредитационог тела Србије.

Провера тачности мерења мерне бленде извршена је истовременим мерењем запреминског протока помоћу анемометра са ужареном жицом (слика 5.5) на улазу у усисну грану и мерењем протока помоћу мерне бленде. Сонда са главом пречника седам милиметара је постављена у носач са сталком, слика 5.6. Према стандарду SRPS ISO 10780:2010 "Мерење брзине и запреминског протока струје гасова у каналима" због малог унутрашњег пречника усисне гране од 55 mm мерење је извршено у центру попречног пресека.

Такође, извршено је истовремено мерење запреминског протока мерном блендом и анемометром са ужареном жицом (слика 5.6) постављеном на излазу из стаклене посуде, у коју се сипа узорак, где је дефинисано пет мерних тачака у мерној равни кружног пресека пречника 150 mm према стандарду SRPS ISO 10780:2010. Резултати истовремених мерења су приказани у табели 5.1.



микроманометар  
Alnor AXD 560

термометар Testo 925

влагомер Testo 175-H2

барометар DB3

Слика 5.4 Мерни уређаји за мерење протока ваздуха



## 5. Експериментално испитивање процеса сушења

---



Јединица за прикупљање података



Сонда са ужареним жицом

Слика 5.5 Анемометар са ужареном жицом



Сонда постављена на улазу у усисну грану



Сонда постављена на излазу из стаклене посуде

Слика 5.6 Истовремено мерење запреминског протока помоћу анемометра са ужареном жицом помоћу мерне бленде.

За случај када је анемометар постављен на улазу у усисну грану резултати мерења запреминског протока се разликују до 5%. За други циклус мерења, када је анемометар постављен на излазу из стаклене посуде, резултати се разликују до 6%, осим за оптерећење вентилатора 20% када је разлика протока износила скоро 15%.

## 5. Експериментално испитивање процеса сушења

Табела 5.1 Резултати мерења протока мерном блендом и анемометром

Оптерећење венилатора [%]	Анемометар	Мерна бленда	$\dot{V}_{op}/\dot{V}_{hw}$
	$\dot{V}_{hw}$ [m <sup>3</sup> /min]	$\dot{V}_{op}$ [m <sup>3</sup> /min]	[-]
Анемометар са ужареном жицом на улазу у усисну грану			
20	0,301	0,313	1,03
40	0,580	0,596	1,03
60	0,839	0,873	1,04
80	1,098	1,147	1,04
100	1,350	1,411	1,04
Анемометар са ужареном жицом на излазу из стаклене посуде			
20	0,365	0,313	0,86
40	0,629	0,596	0,95
60	0,870	0,873	1,00
80	1,108	1,147	1,03
100	1,328	1,411	1,06

Може се сматрати да су разлике у измереним протоцима ваздуха задовољавајуће мале, с обзиром да се сонда са ужареном жицом није могла поставити тако да задовољи препоруке стандарда по питању правих деоница испред и иза мерног места, већ је постављена на улазу у усисну грану и на излазу из стаклене посуде где постоји негативан утицај крајева струјних канала.

### 5.3 Припрема узорка угља за процес сушења

За извођење екперимената процеса сушења угља изабран је највише коришћени домаћи лигнит Колубара, релативно ниске топлотне моћи, који има изузетно висок садржај влаге.

Лигнит Колубара је прикупљен из бункера на котловским постројењима блокова А1, А2, и Б1 ТЕ "Никола Тесла" у Обреновцу [83 – 85]. Његове основне карактеристике приказане су у табели 5.2. Прикупљени узорци су уситњени у дробилицама на ситнију гранулацију, погодну за извођење процеса сушења.

У Лабораторији за термотехнику и енергетику, Института за нуклеарне науке "Винча" извршено је просејавање прикупљеног узорка угља кроз стандардна сита. Извршен је избор следећих сита са отворима: 90 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 500 $\mu$ m, 1000 $\mu$ m,

2000 $\mu\text{m}$ , 3150 $\mu\text{m}$  и 4760 $\mu\text{m}$ . Мањи отвори сита нису погодни због филтера, који се налази у пластичном кућишту испод стаклене посуде, који има отворе 45 $\mu\text{m}$ . После процеса дробљења остајала је мала количина угља са гранулацијама већим од једног милиметра, која није довољна за обављање довољног броја експеримената, па су узорци измешани и спојени ради хомогенизације узорака.

После просејавања узорци исте гранулације су упаковани тако да ваздух из околине нема додира са узорком. Добијене су знатно веће количине финијих фракција угља чији је средњи пречник мањи од 1mm.

Садржај воде у узорцима је мерен у лабораторији непосредно након отварања сваког паковања, а пре извођења експеримената са изабраном гранулацијом угља. Одређен је на тај начин, што је узорак угља сушен у лабораторијској сушници Binder ED-53 на 105°C и измерен на аналитичкој ваги Mettler AE200-S, 0-205g, тачности 0,0001g, пре и после сушења у сушници. Оба уређаја се редовно еталонирају. Резултати мерења садржаја воде у узорку пре процеса сушења  $W_0$  су приказани у табели са измереним масама узорка у Прилогу 2.

Табела 5.2 Основне карактеристике угља у доставном стању прикупљеног за извођење експеримената

Узорак Блок- Тест	Угљеник [%]	Водоник [%]	Кисеоник [%]	Азот [%]	Сумпор [%]	Мин. мат. [%]	Влага [%]	DTM [kJ/kg]
A1 - 1	27,17	2,19	11,32	0,31	0,38	10,29	48,34	9343
A1 - 2	25,90	2,17	10,86	0,33	0,34	13,15	47,24	8776
A2 - 2	22,78	1,99	9,74	0,30	0,30	17,02	47,87	7635
A2 - 3	19,40	1,75	8,54	0,27	0,27	18,37	51,39	6167
A2II - 1	20,89	1,86	9,38	0,28	0,30	17,38	49,91	6789
A2II - 2	23,37	2,01	9,72	0,30	0,35	15,06	49,19	7203
B1 - 1	23,86	2,08	9,31	0,81	0,14	13,86	49,94	7861

### 5.4 Опис извођења експеримента

Основна идеја при испитивању процеса сушења узорака лигнита Колубара је да се изврши испитивање процеса сушења при различитим протоцима ваздуха кроз узорак за различите гранулације узорка угља, различите масе узорка и различите температуре ваздуха испред узорка.

Експеримент се изводио на следећи начин. Параметри на апаратури су подешени на жељене вредности и апаратура је пуштена да ради без узорка да би се извршило предгревање апаратуре. Сваки узорак угља је измерен на дигиталној ваги непосредно пре и после извођења експеримента. Након мерења узорка пре процеса сушења, апаратура је заустављана, узорак сипан у посуду и изравнана је горња површина узорка у посуду. Затим је постављен врећасти филтер на стаклену посуду. Апаратура је укључена у рад и одмах је започето снимање података релативне влажности и температуре са сонде за влагу, температуре ваздуха испред узорка и оптерећења вентилатора на сваких десет секунди. Истовремено је извршен и ручни запис мерених величина на улазу у апаратуру, који је вршен осталим инструментима: барометарски притисак, пад притиска и статички притисак, релативна влажност и температура ваздуха испред мерне бленде. Запис је вршен у периоду од 30 секунди до 5 минута у зависности од дужине трајања експеримента и физичких могућности да се изврши запис и стално прати рад апаратуре.

Након завршетка експеримента узорак је пажљиво прикупљен и са зидова стаклене посуде и из врећастог филтера. Једна мала количина узорка се није могла прикупити због расипања финих честица угљеног праха, насталих фрагментацијом честица узорка угља, приликом скидања врећастог филтера са стаклене посуде.

За мерење узорака угља коришћена је еталонирана дигитална вага EUWTN модел 30002CF, произвођача EU instruments. Опсег мерења ваге је од 0 до 3000g, са резолуцијом од 0,01g.

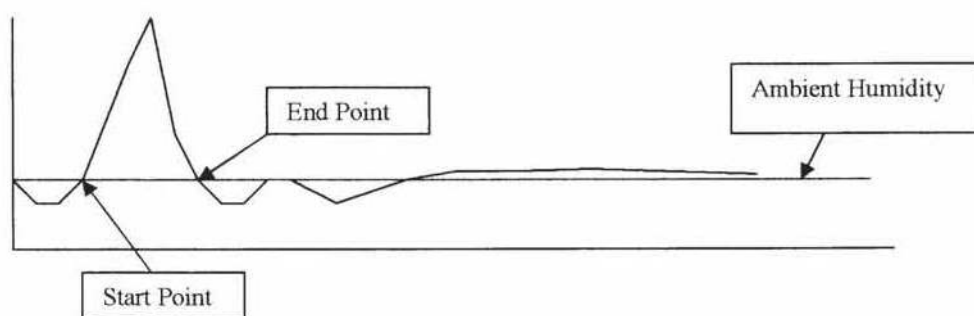
Дужина трајања процеса сушења се морала утврдити експериментално, пошто сушењем угља до садржаја воде у узорку приближном нули, долази до значајних разлика у израчунавању издвојене количине воде из материјала на основу две методе:

- на основу биланса масеног протока ваздуха на улазу и излазу из апаратуре
- на основу мерења узорка угља на ваги непосредно пре процеса и после процеса сушења.

Током пробних експеримената та разлика издвојене количине воде из узорка износила је и до 20% за поједине експерименте према две методе. На основу

искуства других лабораторија са овом апаратуром, препорука је да се мерење захтеваних параметара на излазу из апаратуре током процеса сушења започне и заврши при вредностима релативне влажности ваздуха непосредно вишим или једнаким вредностима релативне влажности околног ваздуха. Постоји више метода које су други корисници ове апаратуре развили према сопственим потребама, које све указују на исти закључак у погледу трајања процеса сушења. Један метод процеса сушења који препоручује испитна лабораторија QAQC LAB дат је на слици 5.7 [86]. Даљим извођењем пробних експеримената дошло се до закључка да се могу добити добри резултати приликом прекидања експеримента када је релативна влажност на излазу из апаратуре једнака или нешто већа од релативне влажности амбијенталног ваздуха.

Такође, за веће протоке и веће температуре предгревања ваздуха испред узорка, бољи резултати се постижу загревањем апаратуре без узорка, пре процеса сушења. Током загревања, сонда за мерење влаге и температуре на излазу из апаратуре, била је извучена ван стаклене посуде. На тај начин скраћен је временски период на почетку процеса сушења у коме је релативна влажност ваздуха на излазу из апаратуре мања од влажности амбијенталног ваздуха, а тиме и смањена грешка мерења.



Слика 5.7 Дијаграмски приказ процеса сушења према Методи 1 QAQC LAB.

Код експеримената са интензивнијим процесом сушења, односно са већим протоком ваздуха, одређена количина честица је упадала у врећасти филтер, што је узроковало незанемарљив губитак узорка током прикупљања после завршеног сушења. Да би се смањио овај губитак узорка, на стаклену цев је монтирана

пластична цев истог пречника, а на њу је постављен врећасти филтер. Тиме је незнатно смањен проток ваздуха, али је боље прикупљен узорак после експеримента.

На основу напред наведених искустава са пробним експериментима усвојено је да се приликом сваког експеримента узорак мери на ваги непосредно пре и после сваког процеса сушења узорка и да се као успешни експерименти могу усвојити они код којих је израчуната разлика количине издвојене воде из узорка по две методе не прелази 2%.

Приликом избора оптималне количине узорка за процес сушења почело се од препоручене висине слоја узорка коју је дао произвођач апаратуре. Експерименти су трајали по више сати, што се показало као предугачак период за рад, јер је потребно непрекидно праћење процеса сушења и записивање мерених величина. Даљи избор је вршен тако да укупно сакупљена количина узорка угља буде довољна за квалитетно извођење свих планираних експеримената, тј. да временски период трајања експеримента буде довољно дуг да се сви неопходни мерени параметри током експеримента могу записати и истовремено пратити процес сушења. Да би све то било спроведено изабране су три масе узорка за рад: 210g, 315g и 420g. Експерименти су трајали од неколико минута до сат времена.

Након пробних експеримената, изабране су три гранулације узорка угља. Код узорка угља чији је средњи пречник честице мањи од једног милиметра, честице угља су се "лепиле" на зидове стаклене посуде по целој површини. На местима где би ваздух прво прошао кроз узорак, углавном у средњем делу попречног пресека посуде, подигао би велику количину честица, слој би у том делу био смањен и ваздух би углавном протицао кроз тај део узорка током целог експеримента. На тај начин, узорак је неравномерно сушен по попречном пресеку, што је уочено и визуелним прегледом узорка на крају експеримента. Током трајања експеримента проток ваздуха се повећавао током времена.

Апаратура има декларисан опсег загревања ваздуха испред узорка од 20 до 200°C. Произвођач је препоручио да се стабилна температура ваздуха испред узорка може остварити при температурама до 150°C. Након више пробних експеримената утврђено је да се температура ваздуха од 120°C испред узорка

може довољно брзо постићи и стабилно одржавати током трајања експеримента. Изабране су три температуре загревања ваздуха испред узорка: 60°C, 90°C и 120°C.

Изабране су три брзине сушења за сваку од три изабране гранулације. Прво су узорци сушени у непокретном слоју, односно током целог процеса сушења није долазило до појаве мехурова ваздуха у слоју узорка. Други изабрани проток ваздуха је такав да се створи процес сушења у флуидизованом слоју тако да дође до појаве малих ваздушних мехурова у слоју, односно да је брзина флуидизације тек нешто већа од минималне брзине флуидизације. Трећи проток за сваку гранулацију је изабран тако што је оптерећење вентилатора повећано за око 40% у односу на други проток, чиме је створен знатно интензивнији процес флуидизације са појавом великих мехурова. Даље повећање протока доводило је до подизања веће количине узорка, чак и код узорака са крупнијим честицама угља, и задржавања у врећастом филтеру који је постављен на крају стаклене посуде. Тај део узорка се сушио у врећастом филтеру иза сонде за мерење влаге и температуре на излазу из апаратуре, што је допринело да се смањи тачност мерења количине издвојене воде из узорка. За изабране протоке ваздуха апаратура је радила са прилично уједначеним протоком ваздуха од почетка до краја експеримента.

### 5.5 Одређивање минималне брзине флуидизације

Пошто су изабрана три различита режима рада за сушење узорака угља, један у непокретном и два у флуидизованом слоју, потребно је одредити минималну брзину флуидизације. Минимална брзина флуидизације је брзина флуида у тренутку почетка флуидизације слоја материјала. Ова величина је битна за избор протока ваздуха и дефинисање оптерећења вентилатора за сва три радна режима сушења. Минимална брзина флуидизације се може одредити рачунски или експериментално.

## 5. Експериментално испитивање процеса сушења

На основу досадашњег истраживачког искуства у Лабораторији за термотехнику и енергетику и доступне литературе [87 - 89] усвојен је најпогоднији израз за рачунско одређивање минималне брзине флуидизације:

$$v_{G,mf} = \frac{\mu \cdot Re_{mf}}{\rho_g \cdot d_p} \quad (5.10)$$

где је:

$$Re_{S,mf} = (a_f^2 + b_f \cdot Ar)^{0,5} - a_f \quad (5.11)$$

Архимедов број се израчунава као:

$$Ar = \frac{g \cdot d_s^3 \cdot \rho_s \cdot (\rho_s - \rho_{Gw,in})}{\mu_{Gw,in}^2} \quad (5.12).$$

На основу литературе [88- 89] може се усвојити да је  $a_f = 24,0$  и  $b_f = 0,049$ .

Густина узорка угља за колубарски лигнит се креће од 1100 до 1400 kg/m<sup>3</sup> [90 - 92]. За температуре ваздуха 60°C, 90°C и 120°C и за све три фракције честица израчуната минимална брзина флуидизације је приказана у табели 5.3.

Табела 5.3 Минимална брзина флуидизације  $v_{G,mf}$  за различите температуре ваздуха

Температура ваздуха $T_{G,in} = 60^\circ\text{C}$		
$d_s = 1,50 \text{ mm}$	$d_s = 2,57 \text{ mm}$	$d_s = 3,95 \text{ mm}$
$v_{G,mf} = 0,63 - 0,73 \text{ m/s}$	$v_{G,mf} = 0,99 - 1,13 \text{ m/s}$	$v_{G,mf} = 1,32 - 1,50 \text{ m/s}$
Температура ваздуха $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$		
$d_s = 1,50 \text{ mm}$	$d_s = 2,57 \text{ mm}$	$d_s = 3,95 \text{ mm}$
$v_{G,mf} = 0,63 - 0,74 \text{ m/s}$	$v_{G,mf} = 1,01 - 1,16 \text{ m/s}$	$v_{G,mf} = 1,36 - 1,55 \text{ m/s}$
Температура ваздуха $T_{G,in} = 120^\circ\text{C}$		
$d_s = 1,50 \text{ mm}$	$d_s = 2,57 \text{ mm}$	$d_s = 3,95 \text{ mm}$
$v_{G,mf} = 0,63 - 0,75 \text{ m/s}$	$v_{G,mf} = 1,03 - 1,19 \text{ m/s}$	$v_{G,mf} = 1,40 - 1,60 \text{ m/s}$

### 5.6 Израчунавање апсолутне влажности материјала током процеса сушења

Мерење и израчунавање апсолутне влажности материјала извршено је на основу количине воде издвојене у материјалу по две методе: мерењем на ваги непосредно пре процеса и после процеса сушења и на основу биланса масеног протока ваздуха на улазу и излазу из апаратуре.

Издвојена количина воде из узорка током процеса сушења мерењем на ваги се израчунава као разлика масе узорка угља пре и после процеса сушења

$$\Delta m_{W,S} = m_{S,0} - m_{S,end} \quad (5.13),$$



где је маса узорка угља једнака збиру масе сувог узорка и масе воде у узорку.

Иста количина воде издвојена из узорка угља може се израчунати основу биланса масеног протока ваздуха на улазу и излазу из апаратуре, што је погодно да се издвојена количина воде из узорка прати током просеца сушења, јер се врши континуалан запис свих неопходних параметара током трајања експеримента.

На основу израчунатог масеног протока влажног ваздуха кроз мерну бленду (једначине 5.1 и 5.2) може се одредити маса влажног ваздуха, која је прошла кроз мерну бленду као производ масеног протока и времена трајања експеримента.

$$m_{Gw,op} = \dot{m}_{op} \cdot \tau \quad (5.14).$$

Маса влажног ваздуха, који је прошао кроз мерну бленду кроз сонду једнака је збиру масе сувог ваздуха и масе воде у ваздуху:

$$m_{Gw,op} = m_{Gd,op} + m_{w,op} \quad (5.15).$$

Маса сувог ваздуха који је прошао кроз мерну бленду се може израчунати на следећи начин:

$$m_{Gd,op} = \frac{m_{Gw,op}}{1+Y_{op}} \quad (5.16),$$

а маса воде у том истом ваздуху се израчунава на следећи начин:

$$m_{w,op} = m_{Gd,op} \cdot Y_{op} \quad (5.17).$$

Апсолутна влажност ваздуха испред мерне бленде се израчунава као

$$Y_{op} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{op} \cdot p_{ps,op}}{p_{G,op} - \varphi_{op} \cdot p_{ps,op}} \quad (5.18).$$

Притисак влажног ваздуха код мерне бленде је једнак збиру барометарског притиска и статичког притиска код мерне бленде:

$$p_{G,op} = p_{bar} + p_{Gst,op} \quad (5.19).$$

Цела апаратура је добро заптивена и нема цурења ваздуха кроз спојеве, тако да иста маса сувог ваздуха која прође кроз мерну бленду прође и кроз мерни пресек на крају апаратуре, код сонде за мерење влаге, односно  $m_{Gd,op} = m_{Gd,hp}$ . Апсолутна влажност ваздуха у излазном пресеку код сонде, за измерене параметре на том месту, се израчунава на исти начин као и апсолутна влажност код мерне бленде (једначина 5.18),

$$Y_{hp} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{hp} \cdot p_{ps,hp}}{p_{G,hp} - \varphi_{hp} \cdot p_{ps,hp}} \quad (5.20)$$

Притисак сувозасићене водене паре у ваздуху у излазном пресеку:

$$p_{ps,hp} = e^{\left(77,3450 + 0,0057 \cdot (273 + T_{G,hp}) - \frac{7235}{273 + T_{G,hp}}\right)} / (273 + T_{G,hp})^{8,2} \quad (5.21)$$

а на основу ње маса воде у ваздуху у излазном пресеку се израчунава према једначини 5.17:

$$m_{w,hp} = m_{Gd,hp} \cdot Y_{hp} \quad (5.22).$$

Маса влажног ваздуха у излазном пресеку се може израчунати као на основу једначине 5.15, пошто су познати маса сувог ваздуха и апсолутна влажност ваздуха у излазном пресеку:

$$m_{Gw,hp} = m_{Gd,hp} + m_{w,hp} \quad (5.23)$$

Густина ваздуха се може израчунати на исти начин као у једначини 5.3:

$$\rho_{Gw,hp} = \frac{1}{287,1} \cdot \left(\frac{p_{G,hp}}{273 + T_{G,hp}}\right) - \left(\frac{1}{287,1} - \frac{1}{461,5}\right) \cdot \frac{\varphi_{hp}}{100} \cdot \frac{p_{ps,hp}}{273 + T_{G,hp}} \quad (5.24).$$

Запремински проток ваздуха у излазном пресеку се добија када се маса влажног ваздуха подели са израчунавом густином влажног ваздуха и временом трајања експеримента:

$$\dot{V}_{hp} = \frac{m_{Gw,hp}}{\rho_{Gw,hp} \cdot \tau} \quad (5.25)$$

Масени проток ваздуха у излазном пресеку је једнак производу запреминског протока ваздуха и његове густине

$$\dot{m}_{hp} = \dot{V}_{hp} \cdot \rho_{Gw,hp} \quad (5.26),$$

или се може израчунати као количник масе ваздуха и времена трајања експеримента.

Издвојена маса воде из узорка током процеса сушења, односно трајања експеримента, се рачуна као разлика укупне масе воде у ваздуху измерене у излазном пресеку и масе воде у ваздуху измерене у мерној бленди, односно пре проласка ваздуха кроз материјал:

$$\Delta m_W = m_{w,hp} - m_{w,op} \quad (5.27)$$

Издвојена маса воде из узорка током процеса сушења, добијена по две методе мерењем на ваги и на основу биланса масеног протока ваздуха на улазу и излазу из апаратуре, треба да буде иста:

$$\Delta m_{w,S} = \Delta m_W \quad (5.28).$$

### 5.7 Израчунавање брзине струјања ваздуха непосредно испред узорка материјала

Ваздух који је прошао кроз мерну бленду уводи се у апаратуру и пролази кроз вентилатор и загрејач ваздуха, којим се греје на задату температуру са којом се жели увести у узорак. Масени проток ваздуха испред узорка је непромењен у односу на масени проток ваздуха кроз мерну бленду:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{op} \quad (5.29).$$

Пошто се мења само температура ваздуха после загрејача, односно испред узорка, долази до промене запреминског протока, густине и брзине ваздуха у односу на мерну бленду. Густина ваздуха испред узорка се може израчунати на исти начин као и на осталим местима:

$$\rho_{Gw,in} = \frac{1}{287,1} \cdot \left( \frac{p_{G,in}}{273+T_{G,in}} \right) - \left( \frac{1}{287,1} - \frac{1}{461,5} \right) \cdot \frac{\varphi_{in}}{100} \cdot \frac{p_{ps,in}}{273+T_{G,in}} \quad (5.30).$$

Усваја се да је притисак гаса испред узорка непромењен у односу на притисак гаса код мерне бленде. Релативна влажност ваздуха се израчунава на основу тога што је апсолутна влажност ваздуха константна од мерне бленде до места испред узорка:

$$\varphi_{in} = \frac{Y_{op} \cdot p_{G,in}}{(0,622+Y_{op}) \cdot p_{ps,in}} \cdot 100 \quad (5.31)$$

Притисак сувозасићене водене паре испред узорка

$$p_{ps,in} = e^{\left( 77,3450 + 0,0057 \cdot (273+T_{G,in}) - \frac{7235}{273+T_{G,in}} \right)} / (273 + T_{G,in})^{8,2} \quad (5.32)$$

Запремински проток ваздуха испред узорка је једнак количнику масеног протока и густине влажног ваздуха:

$$\dot{V}_{in} = \frac{\dot{m}_{in}}{\rho_{Gw,in}} \quad (5.33)$$

Унутрашњи пречник посуде испред узорка износи 90mm, односно попречни пресек отвора кроз који струји ваздух је 0,0064 m<sup>2</sup>. Брзина ваздуха на улазу у посуду, непосредно испред узорка, се одређује као однос запреминског протока ваздуха и попречног пресека на улазу у посуду:

$$v_{G,in} = \frac{\dot{V}_{in}}{\rho_{Gw,in}} \quad (5.34)$$

5.8 Мерна несигурност измерених параметара

Мерење протока ваздуха кроз апаратуру, као и детаљан опис инструмената којима је извршено мерење протока ваздуха, детаљно су описано у поглављу 5.2. Мерне несигурности уређаја су одређене на основу еталонирања мерних уређаја у овлашћеним лабораторијама за еталонирање од стране Акредитационог тела Србије, а резултати еталонирања су приказани у табели 5.4.

Релативна мерна несигурност масеног протока се одређује на основу формуле према стандарду SRPS EN ISO 5167-1:2012:

$$\frac{u\dot{m}_{op}}{\dot{m}_{op}} = \sqrt{\left(\frac{u_C}{C}\right)^2 + \left(\frac{u_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_{D_{op}}}{D_{op}}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_{d_{op}}}{d_{op}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{u_{\Delta p_{G,op}}}{\Delta p_{G,op}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{u_{\rho_{Gw,op}}}{\rho_{Gw,op}}\right)^2} \quad (5.35)$$

Табела 5.4 Проширене мерне несигурности уређаја одређене на основу еталонирања

сонда на излазу Sherwood Tornado M501		микроманометар Alnor AXD 560		теморметар Testo 925		влажомер Testo 175-H2		барометар DB3	
$\varphi$ [%] / $T$ [°C]	$U\varphi$ [%] / $UT$ [°C]	$p$ [Pa]	$Up$ [Pa]	$T$ [°C]	$UT$ [°C]	$\varphi$ [%]	$U\varphi$ [%]	$p_{bar}$ [mbar]	$Up_{bar}$ [mbar]
60/20	1,3/0,3	2,0	0,01	0	0,9	26,5	1,3	800	1,09
70/20	1,3/0,3	250	1,14	200	0,9	50,5	1,3	1012	0,99
80/20	1,3/0,3	500	0,75			75,0	1,4	1200	1,14
90/20	1,3/0,3	750	0,59						
95/20	1,4/0,3	1000	0,77						
60/30	1,3/0,3	1250	0,59						
70/30	1,3/0,3	1500	0,26						
80/30	1,3/0,3								
90/30	1,4/0,3								
95/30	1,4/0,3								
60/40	1,4/0,4								
70/40	1,4/0,4								
80/40	1,4/0,4								
86/40	1,4/0,4								
60/50	1,4/0,4								
70/50	1,4/0,4								
80/50	1,4/0,4								

Према стандардима SRPS EN ISO 5167-1:2012 и SRPS EN ISO 5167-2:2012, поглавље 5.3.3, за изграђену експерименталну апаратуру израчунате су следеће релативне мерне несигурности:

- релативна мерна несигурност за коефицијент истицања  $u_C / C = 0,67\%$ ,
- релативна мерна несигурност за коефицијент експанзије  $u_\varepsilon / \varepsilon = 0,05\%$ ,

- релативна мерна несигурност промене притиска износи  $u_{\Delta p_{G,op}} / \Delta p_{G,op} = 0,78\%$ ,
- рел. мерна несигурност густине ваздуха износи  $u_{\rho_{Gw,op}} / \rho_{Gw,op} = 0,15\%$
- релативна мерна несигурност од унутрашњег пречника цеви  $u_{D_{op}} / D_{op} = 0,4\%$ ,
- релативна мерна несигурност од пречника отвора бленде  $u_{d_{op}} / d_{op} = 0,1\%$ ,

На основу израчунатих релативних мерних несигурности утицајних параметара добија се да је релативна мерна несигурност масеног протока 0,45 %, тј. да је проширена релативна мерна несигурност масеног протока 0,9 %, односно, грешка мерења масеног протока не прелази 1%.

Проширена мерна несигурност дигиталне ваге EUWTN модел 30002CF, којом је извршено мерење узорака угља пре и после процеса сушења, одређује се на основу једначине добијене еталонирањем ваге

$$U_{m,s0} = 0,0018 + 0,0000987 \cdot m_{s,0} \quad (5.36).$$

За најчешће коришћене масе узорака 210 g, 315 g и 420g проширене мерне несигурности износе 0,04 g, 0,05 g и 0,06 g.

За аналитичку вагу Mettler AE200-S проширена мерна несигурност мерења масе узорка се одређује на основу једначине

$$U_{m,s0} = 0,000137 + 0,000023 \cdot m_{s,0} \quad (5.37)$$

Приликом одређивања садржаја влаге у узорку угља пре извођења експеримената узимана је маса узорка од 1 g, што даје мерну несигурност мерења масе узорка од 0,00016 g.

### 5.9 Резултати експерименталних испитивања

За потребе испитивања процеса сушења честица угља извршено је више од сто експеримената. Резултати 48 изабраних успешно извршених експеримената су приказани у овој тези за:

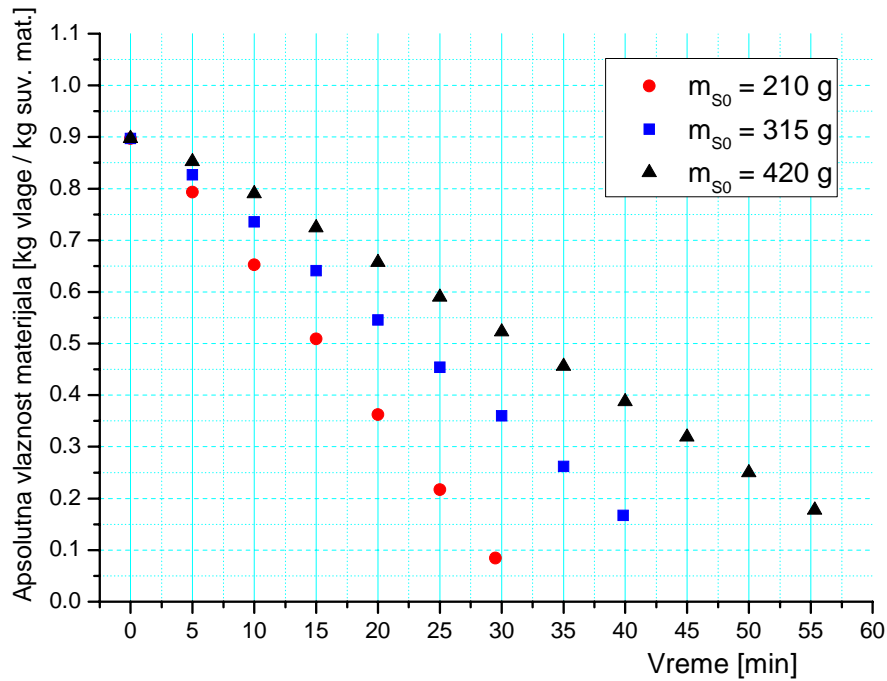
- за три различите гранулације угља чији су средњи пречници угља: 1,5 mm , 2,57 mm, и 3,95 mm,

- за три различите масе угља: 210 g, 315 g и 420 g,
- за три различите брзине сушења узорка: сушење у непокретном слоју и сушење у флуидизованом слоју са две различите брзине флуидизације,
- за три различите температуре ваздуха непосредно испред узорка: 60 °C, 90 °C и 120 °C.

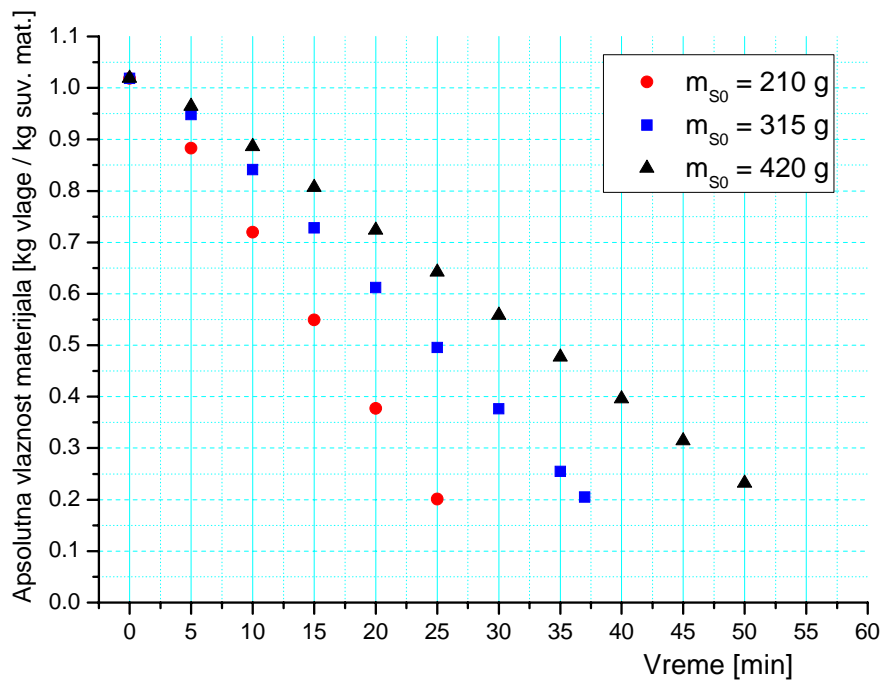
Резултати експерименталних испитивања апсолутне влажности материјала су дати дијаграмски у овом одељку, а детаљнији приказ измерених и израчунатих вредности дат је табеларно и дијаграмски у прилозима 1 и 2.

Резултати процеса сушења угља у непокретном слоју за три различите масе узорка и три величине честица узорка дати су на сликама 5.8 до 5.10. За процес сушења угља у флуидизованом слоју при брзини флуидизације, која је нешто виша од минималне, резултати су приказани на сликама од 5.11 до 5.13. При интензивнијој флуидизацији, где је брзина ваздуха испред узорка повећана за око 50 %, резултати испитивања су приказани на сликама од 5.14 до 5.16. За све експерименте на сликама 5.8 до 5.16 ваздух испред узорка је загрејан на температуру од 90 °C.

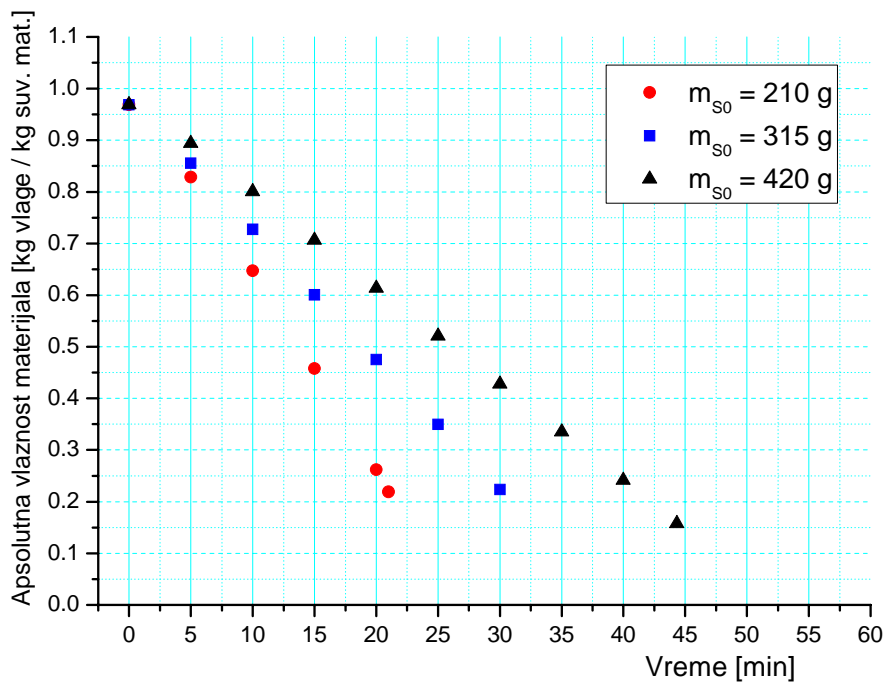
Утицај температуре загревања ваздуха испред узорка за три брзине сушења и три пречника честица приказани су на сликама: од 5.17 до 5.19 за сушење у непокретном слоју, од 5.20 до 5.22 за сушење у флуидизованом слоју при брзини флуидизације нешто вишој од минималне и од 5.23 до 5.25 за сушење на већој брзини флуидизације. За ове експерименте узорак угља је био исте масе (210g).



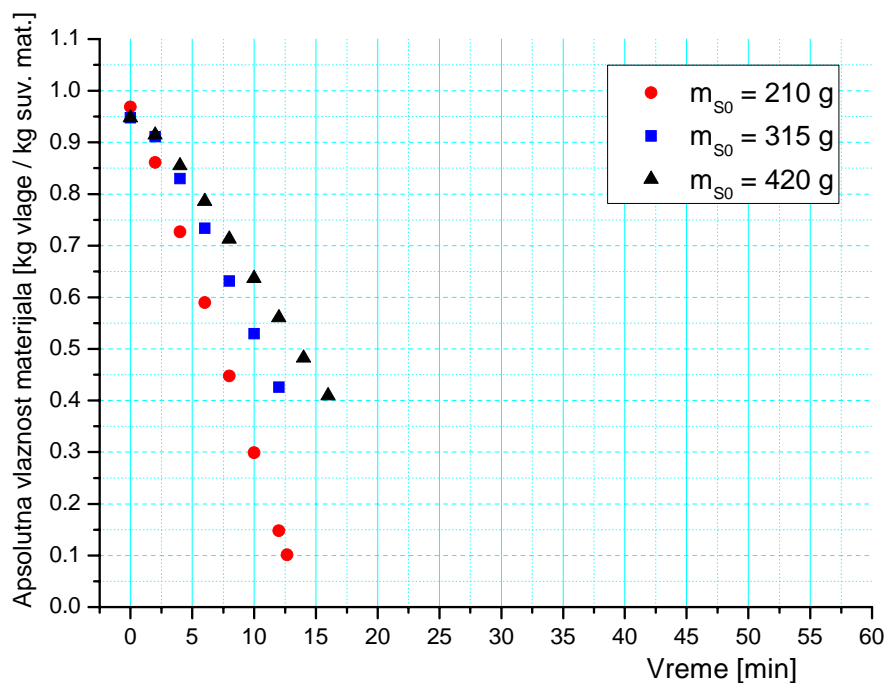
Слика 5.8 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,21} = 210$ g,  $m_{s0,23} = 315$ g и  $m_{s0,22} = 420$ g. Експерименти број 21, 22, 23:  $d_s = 1,50$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 0,6$  m/s,  $X_0 = 0,897$ ,  $Y_{in} = 0,014$



Слика 5.9 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,27} = 210$ g,  $m_{s0,28} = 315$ g и  $m_{s0,29} = 420$ g. Експерименти број 27, 28, 29:  $d_s = 2,57$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 0,6$  m/s,  $X_0 = 1,019$ ,  $Y_{in} = 0,013$

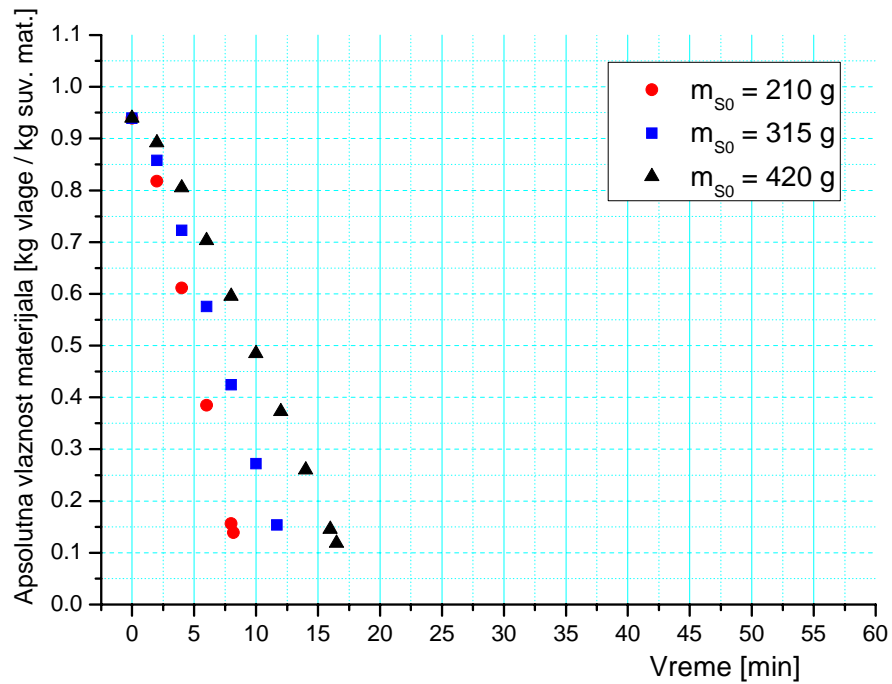


Слика 5.10 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,24} = 210$ g,  $m_{s0,25} = 315$ g и  $m_{s0,26} = 420$ g. Експерименти број 24, 25, 26:  $d_s = 3,95$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 0,7$  m/s,  $X_0 = 0,969$ ,  $Y_{in} = 0,013$

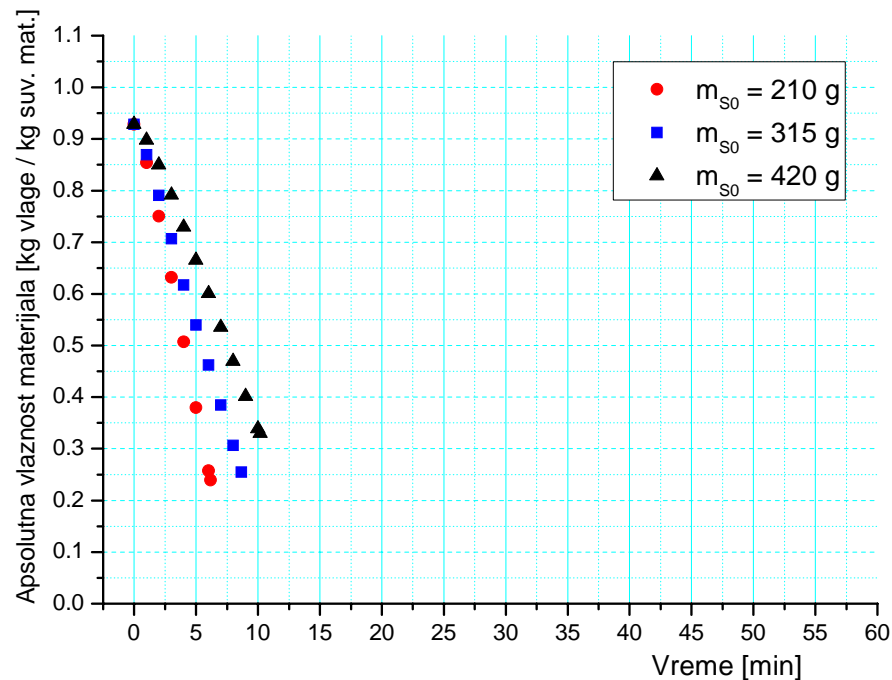


Слика 5.11 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,31} = 210$ g,  $m_{s0,36} = 315$ g и  $m_{s0,37} = 420$ g. Експерименти број 31, 36, 37:  $d_s = 1,50$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 1,3$  m/s,  $X_0 = 0,958$ ,  $Y_{in} = 0,008$

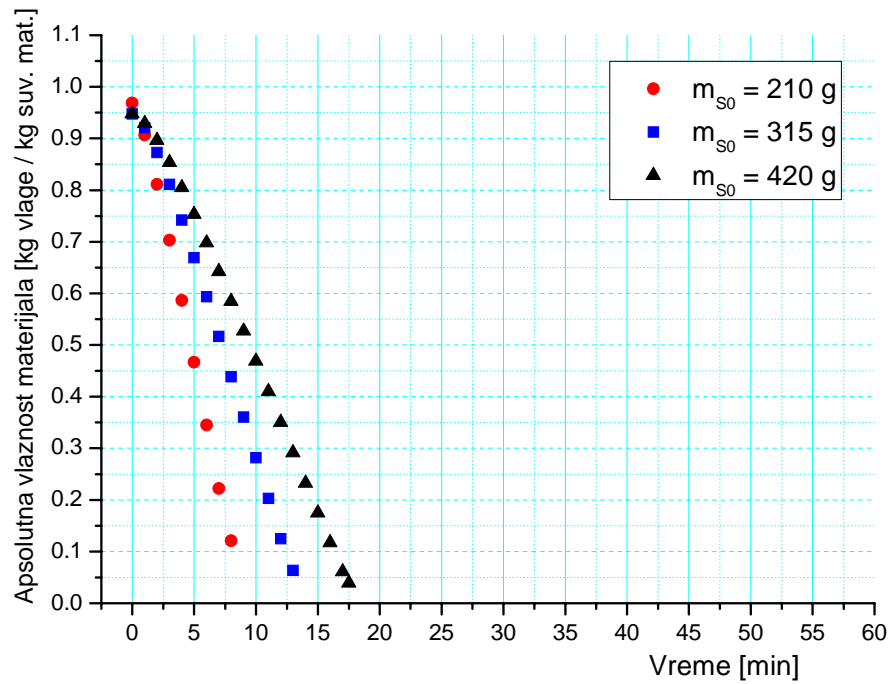




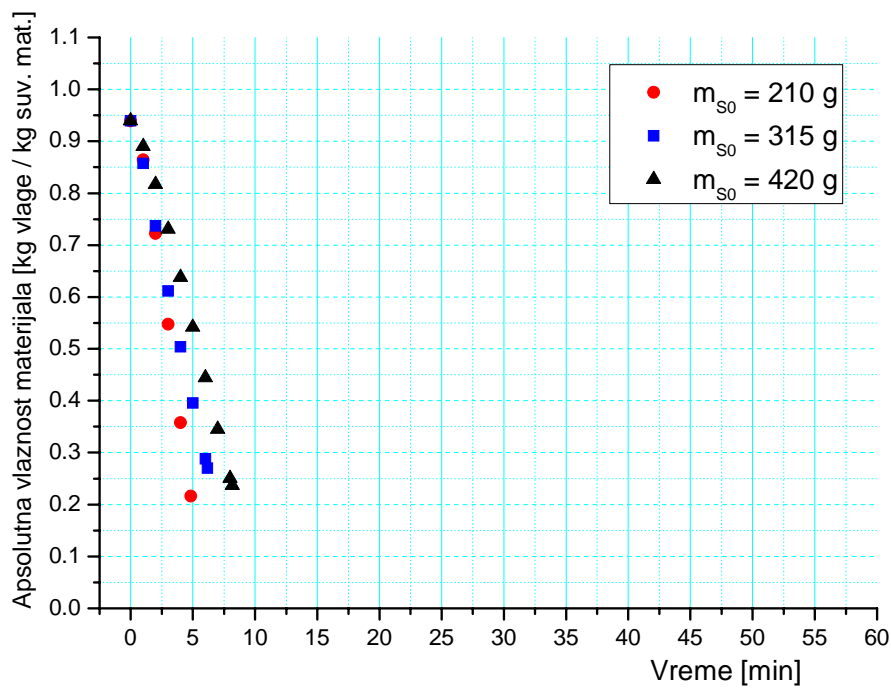
Слика 5.12 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,42} = 210$ g,  $m_{s0,41} = 315$ g и  $m_{s0,40} = 420$ g. Експерименти број 40, 41, 42:  $d_s = 2,57$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 1,9$  m/s,  $X_0 = 0,939$ ,  $Y_{in} = 0,009$



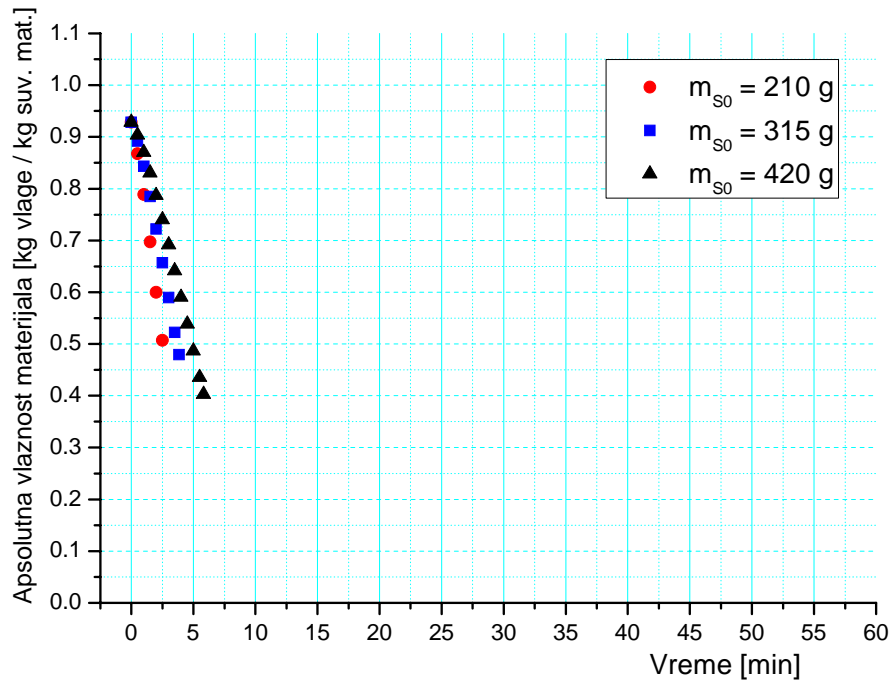
Слика 5.13 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,52} = 210$ g,  $m_{s0,51} = 315$ g и  $m_{s0,50} = 420$ g. Експерименти број 50, 51, 52:  $d_s = 3,95$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 2,1$  m/s,  $X_0 = 0,928$ ,  $Y_{in} = 0,008$



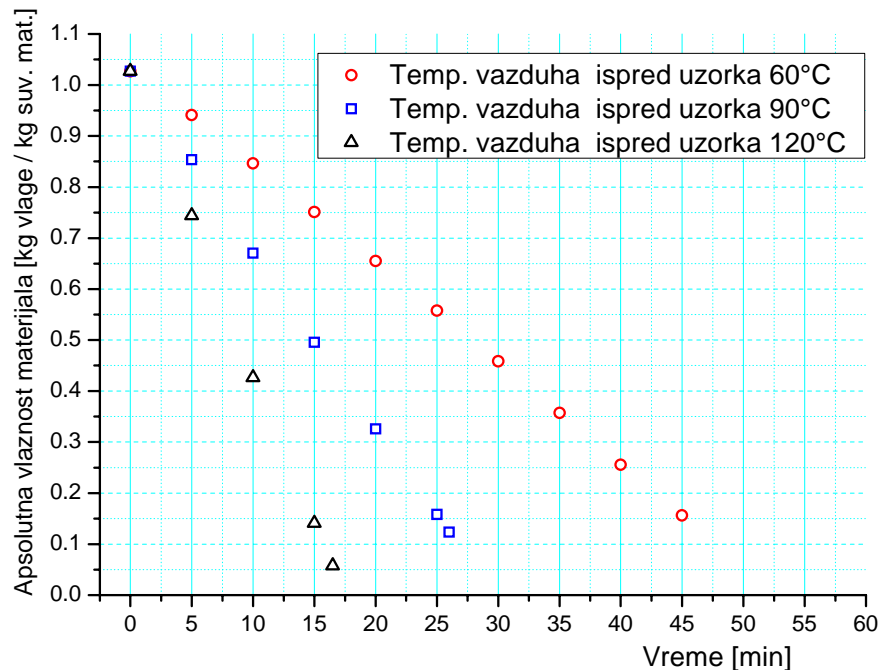
Слика 5.14 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,34} = 210$ g,  $m_{s0,38} = 315$ g и  $m_{s0,39} = 420$ g. Експерименти број 34, 38, 39:  $d_s = 1,50$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 1,9$  m/s,  $X_0 = 0,958$ ,  $Y_{in} = 0,008$



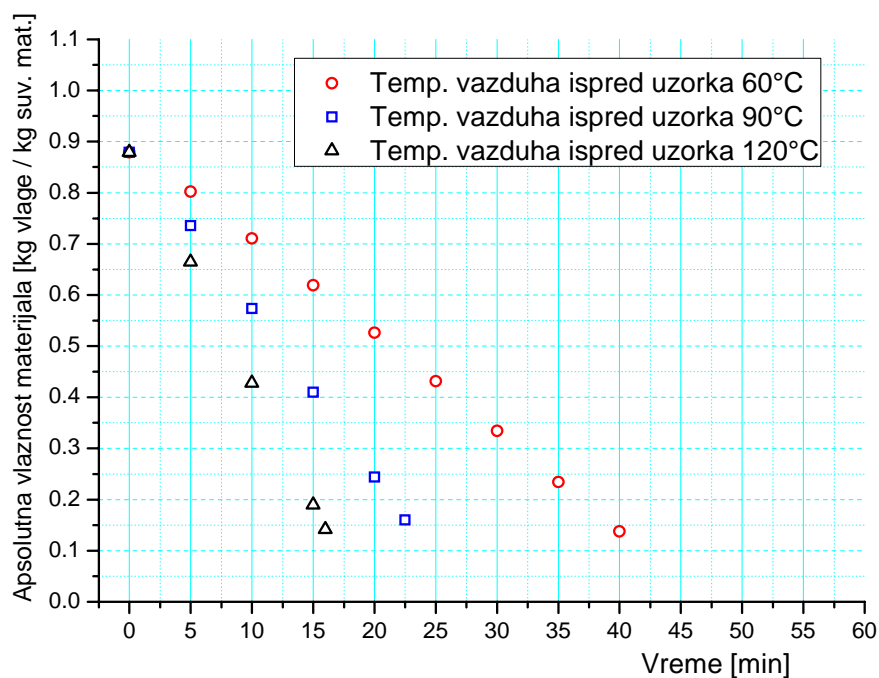
Слика 5.15 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{s0,46} = 210$ g,  $m_{s0,48} = 315$ g и  $m_{s0,49} = 420$ g. Експерименти број 46, 48, 49:  $d_s = 2,57$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 2,9$  m/s,  $X_0 = 0,939$ ,  $Y_{in} = 0,009$



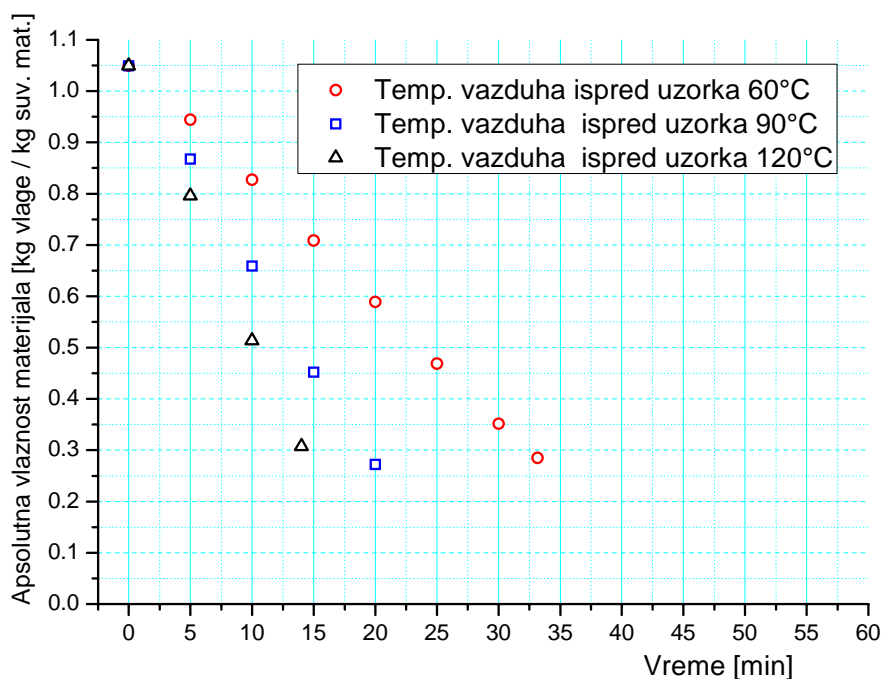
Слика 5.16 Резултати сушења три различите масе узорка угља  $m_{S0,57} = 210$ g,  $m_{S0,58} = 315$ g и  $m_{S0,59} = 420$ g. Експерименти број 57, 58, 59:  $d_S = 3,95$  mm,  $T_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 3,1$  m/s,  $X_0 = 0,928$ ,  $Y_{in} = 0,007$



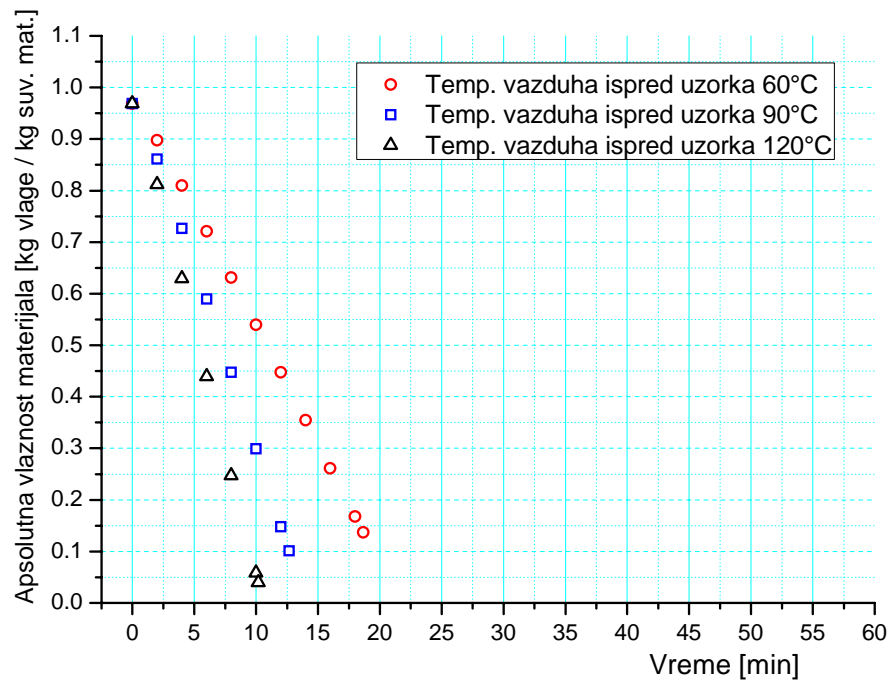
Слика 5.17 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,7} = 60^\circ\text{C}$ ,  $T_{G,in,10} = 90^\circ\text{C}$  и  $T_{G,in,12} = 120^\circ\text{C}$ . Експерименти број 7, 10, 12:  $d_S = 1,50$  mm,  $m_{S0} = 210$ g,  $v_{G,in} = 0,6$  m/s,  $X_0 = 1,027$ ,  $Y_0 = 0,008$



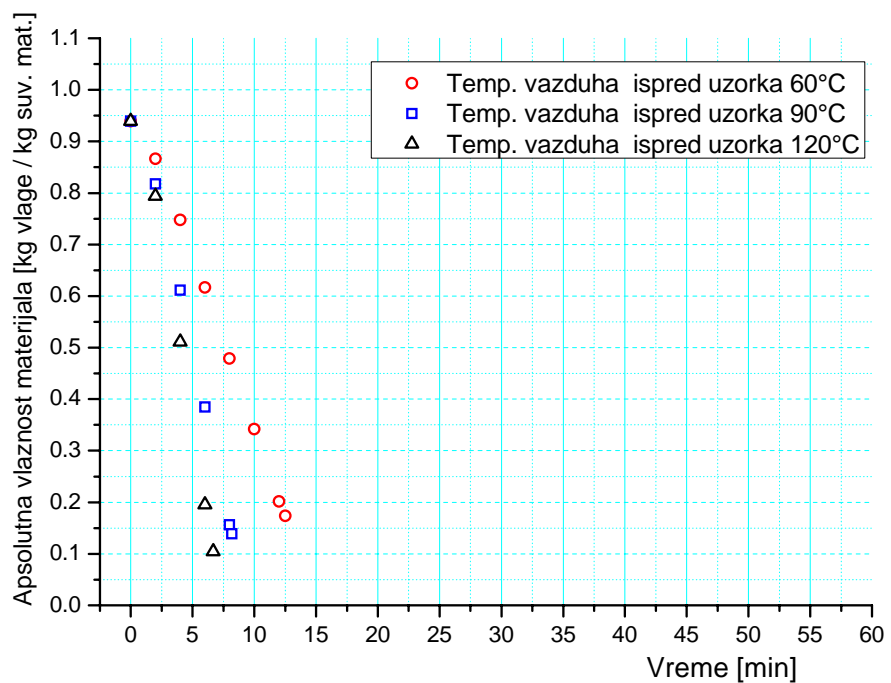
Слика 5.18 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,15} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,19} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,18} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 15, 17, 18:  $d_s = 2,57 \text{ mm}$ ,  $m_{s0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 0,879$ ,  $Y_0 = 0,008$



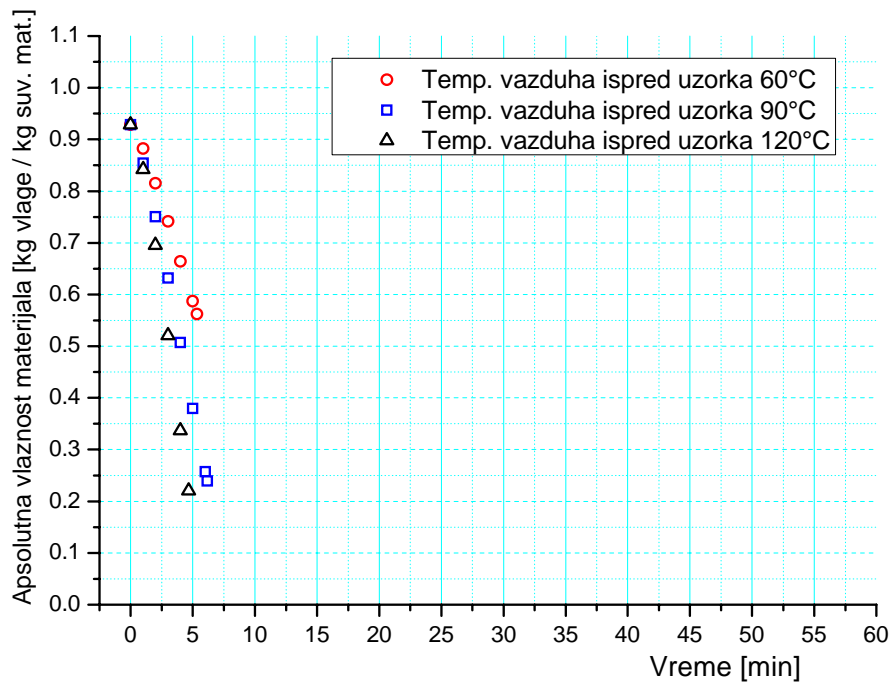
Слика 5.19 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,9} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,11} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,13} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 9, 11, 13:  $d_s = 3,95 \text{ mm}$ ,  $m_{s0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 0,7 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 1,050$ ,  $Y_0 = 0,012$



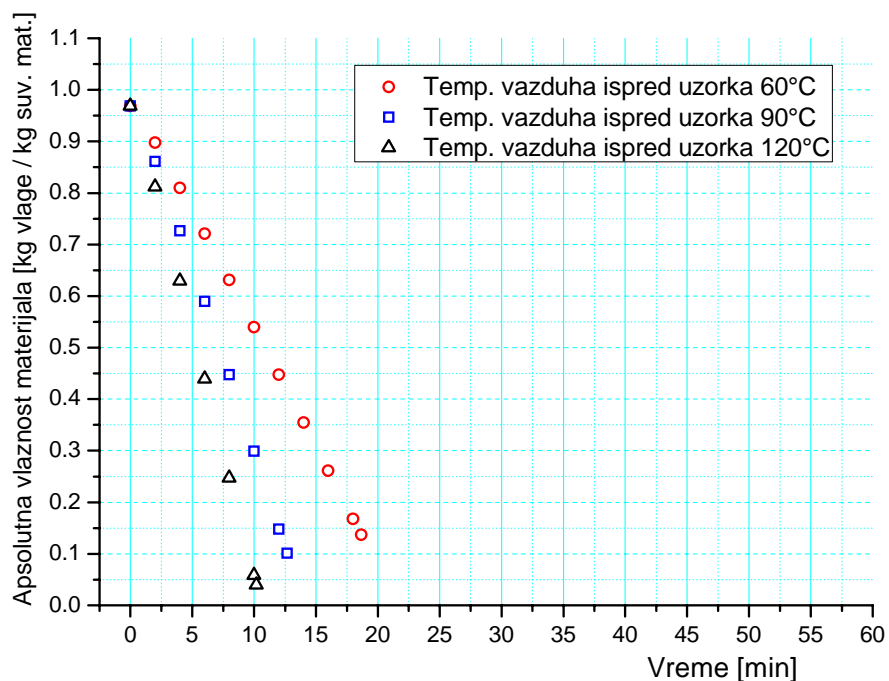
Слика 5.20 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,30} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,31} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,32} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 30, 31, 32:  $d_S = 1,50 \text{ mm}$ ,  $m_{S0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 1,3 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 0,969$ ,  $Y_0 = 0,007$



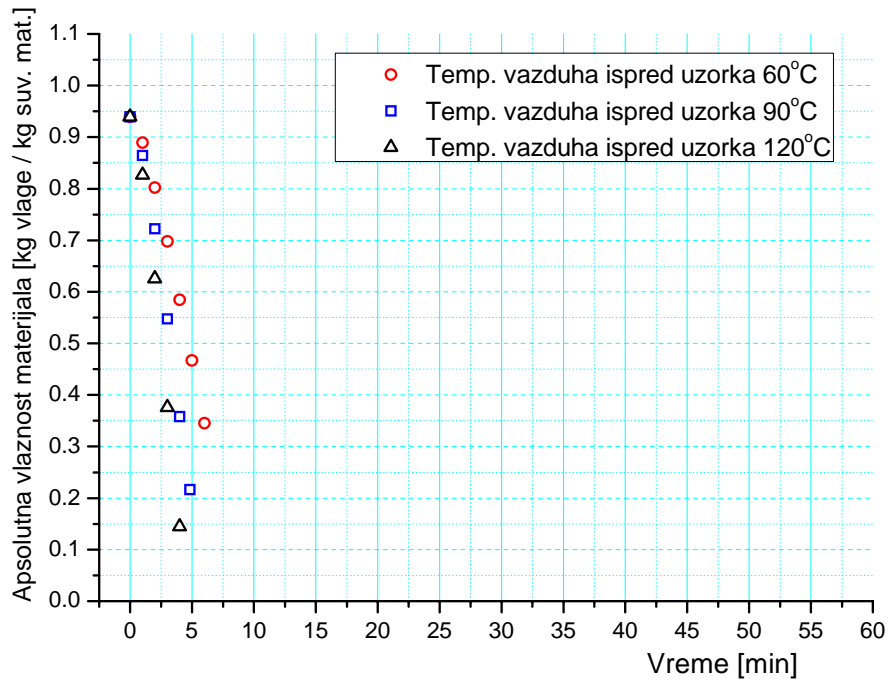
Слика 5.21 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,43} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,42} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,44} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 42, 43, 44:  $d_S = 2,57 \text{ mm}$ ,  $m_{S0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 2,0 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 0,939$ ,  $Y_0 = 0,009$



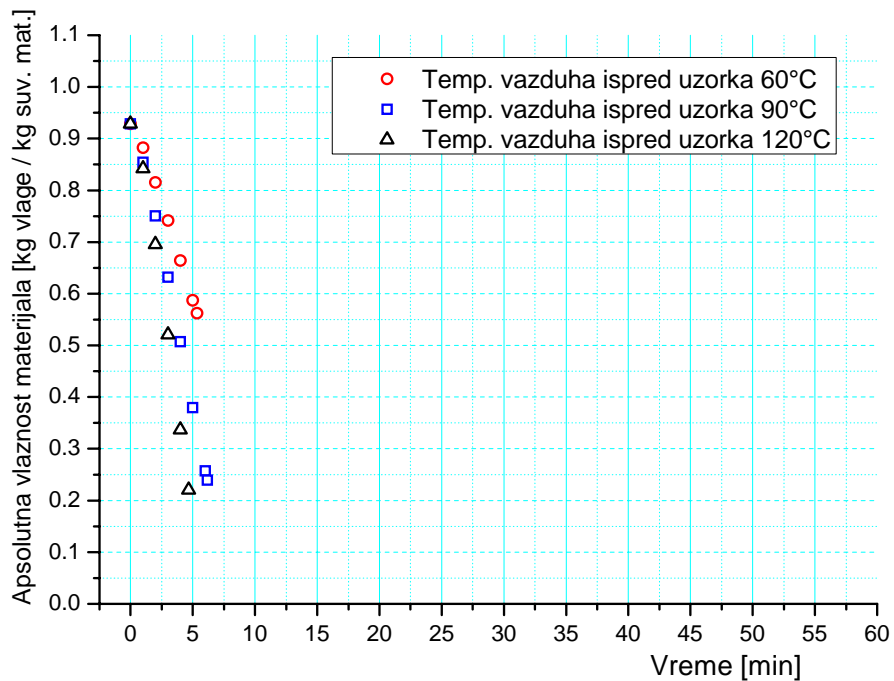
Слика 5.22 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,53} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,52} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,54} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 52, 53, 54:  $d_s = 3,95 \text{ mm}$ ,  $m_{s0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 2,1 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 0,928$ ,  $Y_0 = 0,008$



Слика 5.23 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,33} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,34} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,35} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 33, 34, 35:  $d_s = 1,50 \text{ mm}$ ,  $m_{s0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 1,9 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 0,969$ ,  $Y_0 = 0,008$



Слика 5.24 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,45} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,46} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,47} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 45, 46, 47:  $d_s = 2,57 \text{ mm}$ ,  $m_{S0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 2,9 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 0,939$ ,  $Y_0 = 0,009$



Слика 5.25 Резултати сушења узорка угља за три улазне температуре  $T_{G,in,56} = 60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{G,in,57} = 90^{\circ}\text{C}$  и  $T_{G,in,55} = 120^{\circ}\text{C}$ . Експерименти број 55, 56, 57:  $d_s = 3,95 \text{ mm}$ ,  $m_{S0} = 210\text{g}$ ,  $v_{G,in} = 3,1 \text{ m/s}$ ,  $X_0 = 0,928$ ,  $Y_0 = 0,007$

## 6. ВАЛИДАЦИЈА МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА

Развијени математички модел нестационарног једнодимензијског преноса топлоте и супстанције у непокретном/насутом и флуидизованом слоју и програм за рачунар су проверавани на основу експерименталних резултата добијених на одговарајућој апаратури.

Серија експерименталних података, добијених коришћењем експерименталне апаратуре за сушење Sherwood Fluid Bed Dryer 501, упоређена са резултатима математичког модела. Узорци Колубарског лигнита, гранулације од 1,5 mm до 4 mm и почетног садржаја воде (по сувој основи материјала) око 1,0 су осушени применом топлог ваздуха као агенса сушења са улазним температурама 60 °C, 90 °C и 120 °C. Брзине ваздуха испред слоја материјала су износиле око 0,6 m/s за сушење у непокретном слоју, а за сушење у флуидизованом слоју од 1,3 m/s до 3,1 m/s.

## 6.1 Валидација математичког модела у непокретном слоју

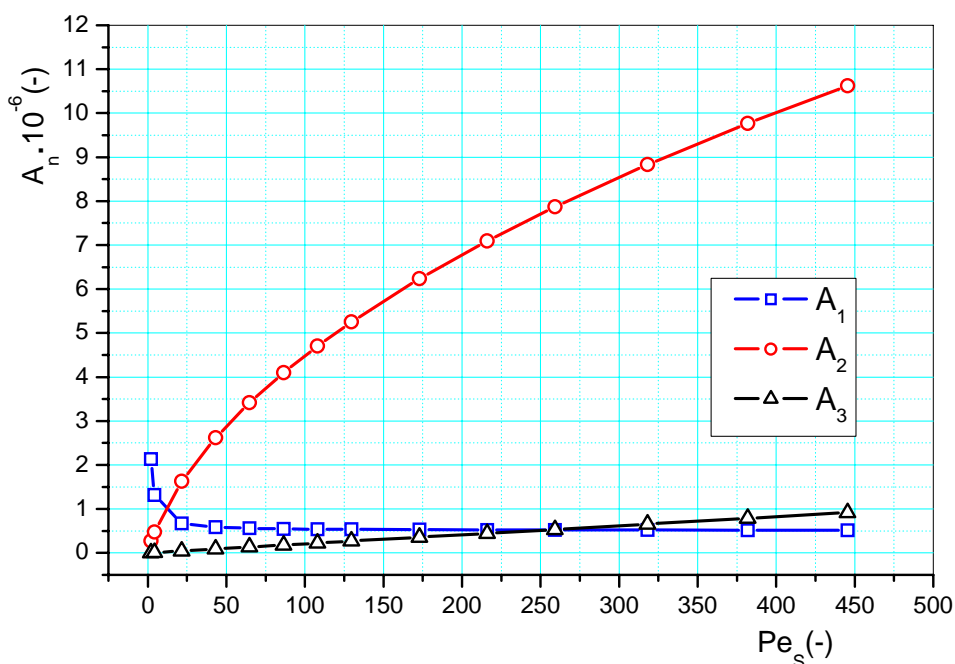
Математички модел у непокретном слоју је потврђен у прошлости претходним одређивањем равнотежних стања и кинетике сушења како појединачне честице тако и елементарног (танког) слоја материјала, имплементацијом тако добијених параметара (зависних од карактеристика материјала) и применом модела на симулацију процеса сушења дубоког слоја разматраног материјала, при чему су резултати добијени симулацијом поређени са одговарајућим експерименталним резултатима за случај различитих материјала биолошког порекла, укључујући зрна кукуруза, кукуруза на кукурузном клипу, зрна пшенице, мака, коцкица кромпира, итд. [71 - 73]. Исти тип валидације урађен је и за лигнит Колубара. Зависни параметри преузети су из [76], што је приказано у табели 6.1.

Табела 6.1 Својства лигнита Колубара

$d_{s,d}$ (mm)	$\rho_{s,d}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{b,d}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_{s,d}$ kJ/(kg·K)	$\lambda_s$ W/(m·K)	$\Psi$ -	$\phi_s$ -	$v_{mf}$ m/s
1,5; 2,5	1250	600,0	1,55	0,058	0,52	0,7	0,7; 1,1



Утицај појединачних механизма преноса топлоте, као што је претходно објашњено у поглављу 4.5, је израчунат за честице лигнита Колубара (својства честица лигнита су дата у табели 6.1) и представљен на слици 6.1. Јасно се може уочити да преовлађује пренос топлоте конвекцијом (између чврсте и гасне фазе) за уобичајене вредности  $Re_{G,in}$  овог критеријума за одговарајући параметар ( $v_{G,in} > 1,0$  m/s). У сваком случају, појединачни механизми преноса топлоте су збирно урачунати кроз еквиваленти Nusselt-ов критеријум који је дат у једначини (4.44) и који је коришћен у моделу.

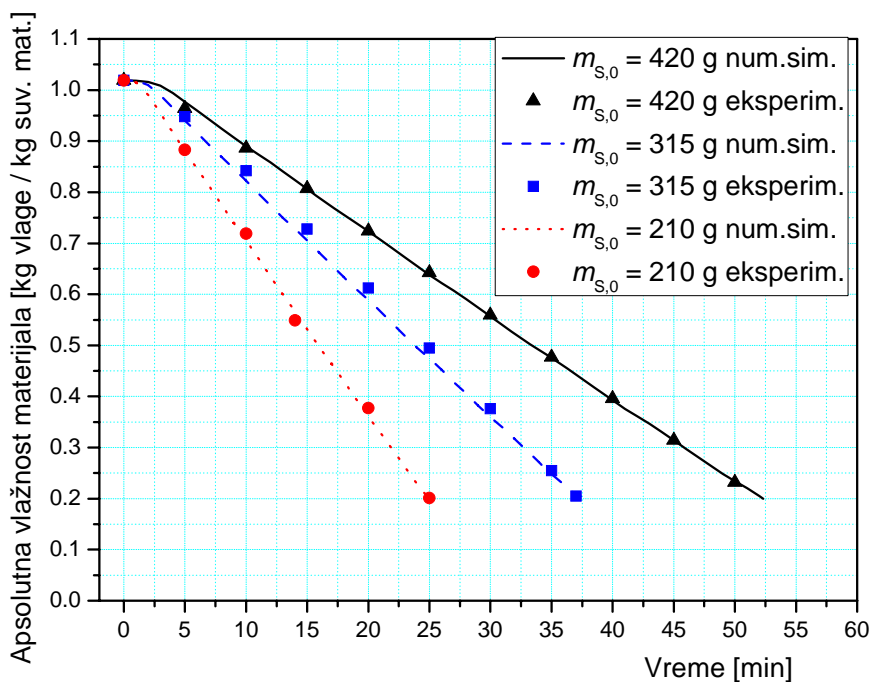


Слика 6.1 Утицај аксијалног преноса топлоте ( $A_1$ ), преноса топлоте између гаса и честица ( $A_2$ ) и преноса топлоте кроз честицу ( $A_3$ ) за непокретни слој честица угља, рачунато на основу својстава честица лигнита Колубара из табеле 6.1

Поређење резултата процеса сушења у непокретном слоју лигнита Колубара добијених експериментом и математичким моделом извршено је на честицама средњег пречника 2,57 mm. Температура загрејаног ваздуха испред слоја износила је 90 °C, а почетни садржај влаге (по сувој основи материјала) је био 1,019. Поређени су узорци лигнита Колубара са три различите масе: 210 g, 315 g и 420 g (слика 6.2).

На основу резултата кинетике сушења лигнита Колубара у непокретном слоју, добијених експериментом и математичким моделом и приказаних на слици 6.2, може се закључити да је добијено добро слагање експерименталних и

израчунатих резултата за сва три узорка, а најбоље слагање резултата је остварено за узорак од 420 g.

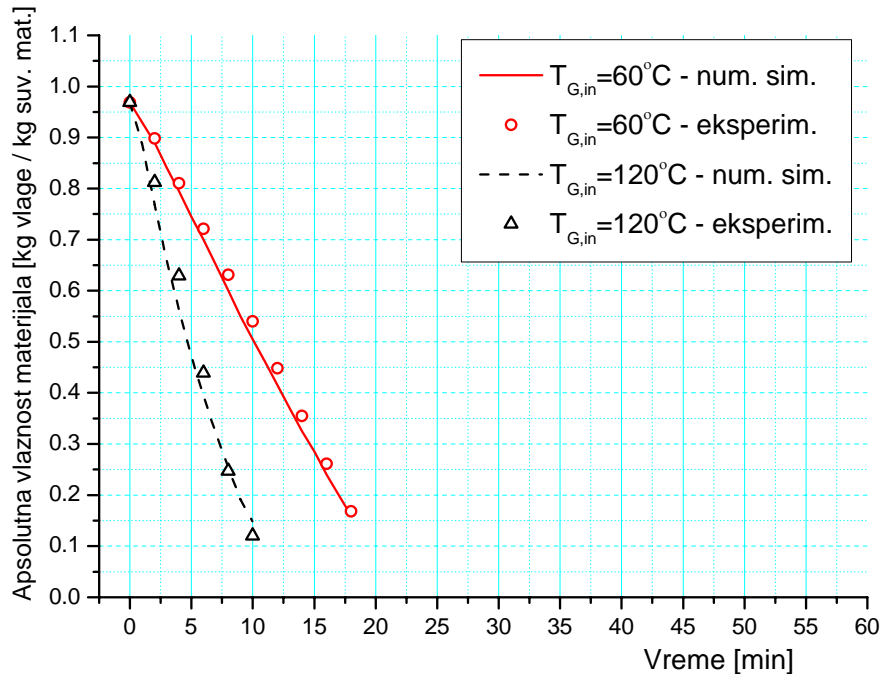


Слика 6.2 Кинетика сушења лигнита Колубара у непокретном слоју одређена експериментом и математичким моделом за три масе узорка: 210g, 315g и 420g;  $X_0 = 1,019$ ,  $Y_0 = 0,013$ ,  $t_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $v_{G,in} = 0,6$  m/s,  $d_s = 2,57$  mm,

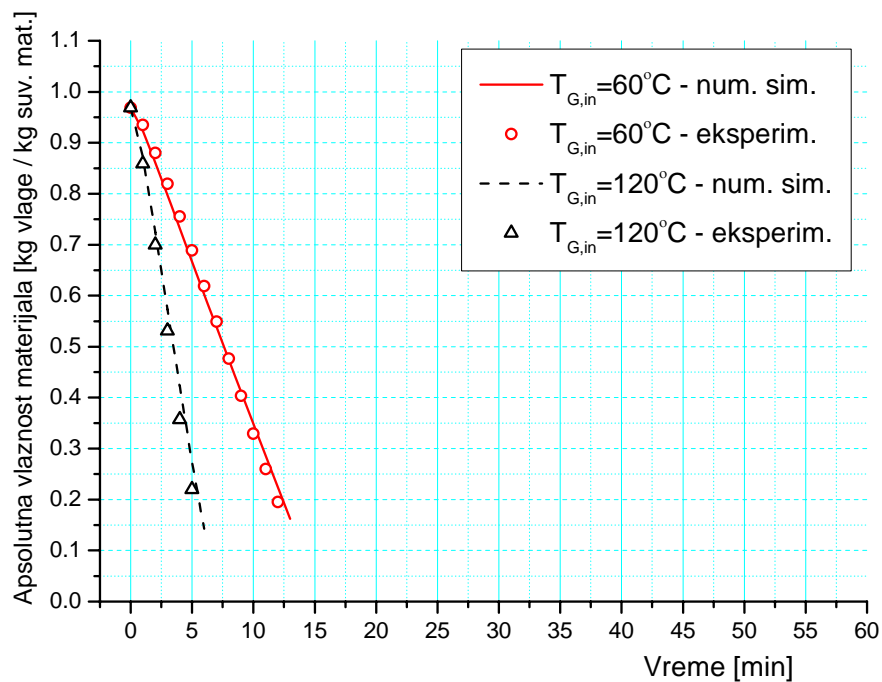
## 6.2 Валидација математичког модела у флуидизованом слоју

Поређење резултата кинетике сушења у флуидизованом слоју лигнита Колубара добијених експериментом и математичким моделом извршено је на шест узорка: четири узорка са честицама средњег пречника 1,5 mm и два узорка са честицама средњег пречника 2,57 mm. Почетни садржај влаге (по сувој основи материјала), за честице средњег пречника 1,5 mm, је био 0,969, а за честице средњег пречника 2,57 mm 0,939. По два узорка лигнита Колубара, са честицама средњег пречника 1,5 mm, су поређена за брзине ваздуха испред слоја: 1,3 m/s (слика 6.3) и 1,9 m/s (слика 6.4), док су два слоја са честицама средњег пречника 2,57 mm поређена за брзину ваздуха испред слоја 1,9 m/s (слика 6.5). За сваку брзину струјања испред слоја ваздух је загреван на две температуре: 60 °C и 120 °C. Маса свих шест узорка на почетку процеса сушења је била иста 210 g.

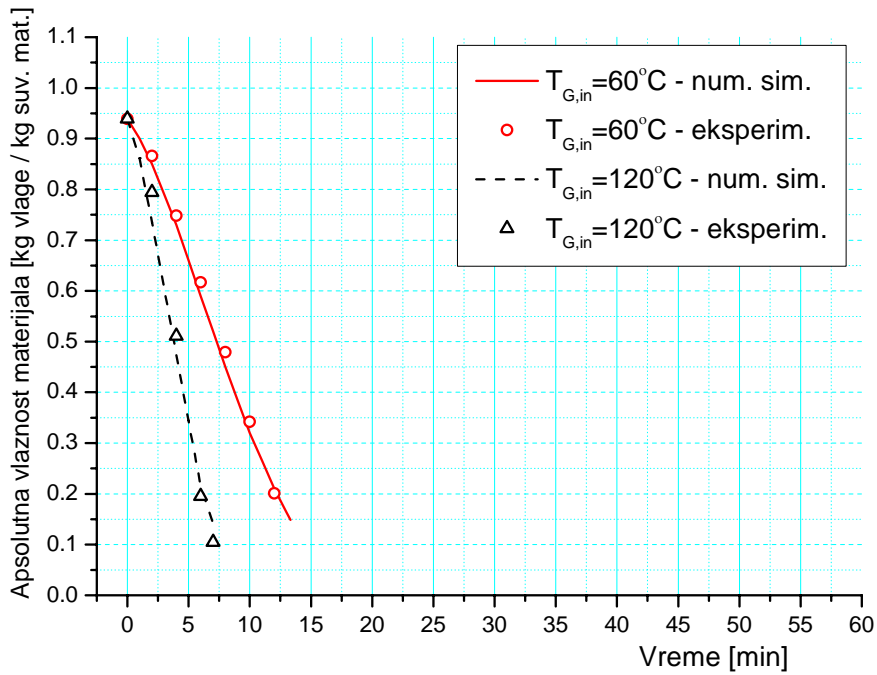
На основу резултата, приказаних на сликама 6.3, 6.4 и 6.5, може се закључити да је добијено задовољавајуће слагање резултата кинетике сушења добијене експериментом и кинетике сушења добијене прорачуном.



Слика 6.3 Кинетика сушења лигнита Колубара у флуидизованом слоју одређена експериментом и математичким моделом за две различите улазне температуре:  $60^\circ\text{C}$  и  $120^\circ\text{C}$ ;  $X_0 = 0,969$ ,  $v_{G,in} = 1,3 \text{ m/s}$ ,  $m_{S0} = 210\text{g}$ ,  $d_S = 1,50 \text{ mm}$ ,  $Y_0 = 0,008$  [93]



Слика 6.4 Кинетика сушења лигнита Колубара у флуидизованом слоју одређена експериментом и математичким моделом за две различите улазне температуре:  $60^\circ\text{C}$  и  $120^\circ\text{C}$ ;  $X_0 = 0,969$ ,  $v_{G,in} = 1,9 \text{ m/s}$ ,  $m_{S0} = 210\text{g}$ ,  $d_S = 1,50 \text{ mm}$ ,  $Y_0 = 0,008$  [93]



Слика 6.5 Кинетика сушења лигнита Колубара у флуидизованом слоју одређена експериментом и математичким моделом за две различите улазне температуре: 60 °C и 120 °C;  $X_0 = 0,939$ ,  $v_{G,in} = 1,9$  m/s,  $m_{S0} = 210$ g,  $d_s = 2,57$  mm,  $Y_0 = 0,008$  [93]

### 7. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И УТИЦАЈА ПОЈЕДИНИХ ПАРАМЕТАРА НА ПРОЦЕС СУШЕЊА

#### 7.1 Анализа резултата развијеног математичког модела и извршених експерименталних испитивања

На основу приказаних резултата кинетике сушења лигнита Колубара у непокретном/насутом и флуидизованом слоју, добијених експерименталним испитивањима на апаратури за сушење Sherwood Fluid Bed Dryer 501 (слике 5.8–5.25) и математичким моделом нестационарног једнодимензијског преноса топлоте и супстанције (и поређених са експерименталним резултатима, слике 6.2 – 6.5) добијене су криве истог облика као и код других аутора који су вршили испитивања кинетике сушења нискоквалитетних угљева ваздухом у флуидизованом слоју. На слици 7.1 приказане су криве кинетике сушења ваздухом лигнита North Dakota и суббитуминозног угља Powder River Basin (PRB) [28] и мрког угља Loy Yang [13] у флуидизованом слоју одређене експериментом и математичким моделом, који имају висок садржај воде (поглавље 2).

Тачност израза за изотерму десорпције је веома битна за прецизност прорачуна, јер се преко ње дефинише равнотежно стање између материјала и околног гаса, тј. садржај воде на површини материјала у току процеса сушења. Изотерма десорпције која је дефинисана за лигнит Колубара има облик Sigmoid функције (слика 4.2), коју су као најпогоднију применили и други аутори у својим истраживањима сушења нискоквалитетних угљева у флуидизованом слоју. На слици 7.2 приказане су изотерме десорпције лигнита North Dakota, суббитуминозног угља Powder River Basin (PRB) и мрког угља Loy Yang.

Добијено је задовољавајуће слагање експерименталних резултата и резултата израчунатих нумеричком симулацијом за сва три узорка која су осушена у непокретном слоју и за свих шест узорака осушених у флуидизованом слоју.

Разлози који могу довести до одступања експерименталних резултата и резултата добијених математичким моделом су следећи:

математички модел је развијен на претпоставкама да су све честице исте величине и облика у једном временском тренутку, док су уситњене честице

лигнита Колубара у узорку различите величине и различитог, неправилног (најчешће игличастог) облика,

модел занемарује размену топлоте између слоја материјала и зидова посуде, а у току сушења један мали део топлоте се проводи кроз зид посуде,

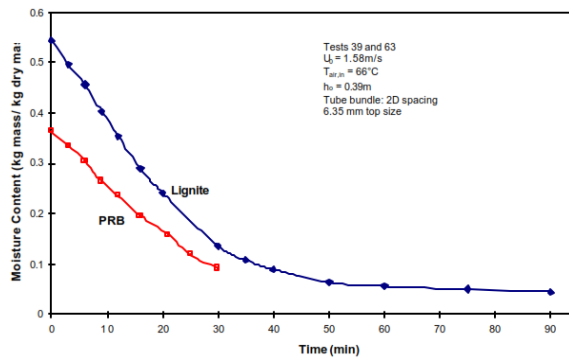
током извођења пробних експеримента долазило је до појаве кондензације влаге на зиду посуде. Да би се могао занемарити овај негативан утицај, непосредно пре извођења сваког експеримента вршено је предгревање апаратуре, чиме је кондензација влаге на зиду посуде сведена на занемарљив удео,

приликом сушења угља један део честица је фрагментирао, а тако уситњене честице су биле однешене струјом ваздуха у зону изнад сонде за мерење влаге и температуре, где су скупљане у врећастом филтеру.

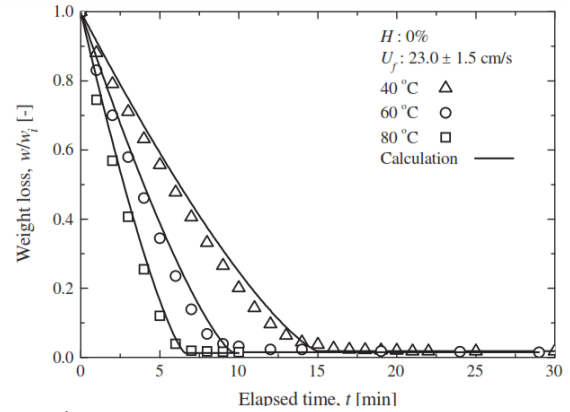
Добро слагање резултата добијених прорачуном са експерименталним резултатима остварено је довољно тачним одређивањем параметара који дефинишу карактеристике честица и слоја материјала као што су: еквивалентни пречник честица, специфична површина честица, специфични топлотни капацитет материјала, густина материја, насипна густина слоја, порозност слоја и минимална брзина флуидизације. Ови параметри су веома битни у једначинама одржања топлоте и супстанције и у једначинама одржања количине кретања, као и приликом одређивања коефицијената преноса топлоте и супстанције.

Развијени математички модел и рачунарски програм је могуће користити за сушење лигнита ваздухом и у непокретном/насутом слоју и у флуидизованом слоју, изменом малог броја параметара у улазним датотекама. Вредност овог модела је у томе што се коришћењем параметара и зависности за процес сушења у лигнита непокретном слоју, добијених на основу експеримената за непокретни слој, овим математичким моделом и рачунарским програмом може израчунавати процес сушења лигнита у флуидизованом слоју, без потребе за одређивањем истих параметара у флуидизованом слоју, која су знатно компликованија и захтевнија за извођење.

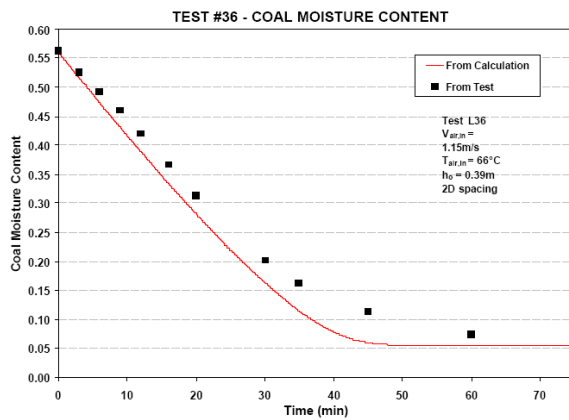
## 7. Анализа резултата и утицаја појединих параметара на процес сушења



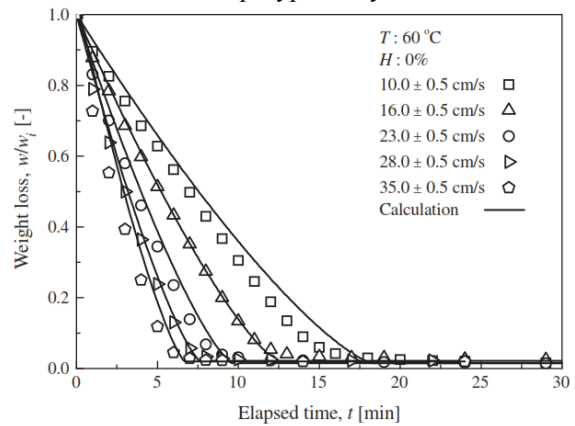
Поређење кинетике сушења за лигнит North Dakota и PRB угаљ на температури ваздуха 66 °C



Поређење кривих сушења мрког угља Loy Yang добијених експериментом и прорачуном за три температуре ваздуха

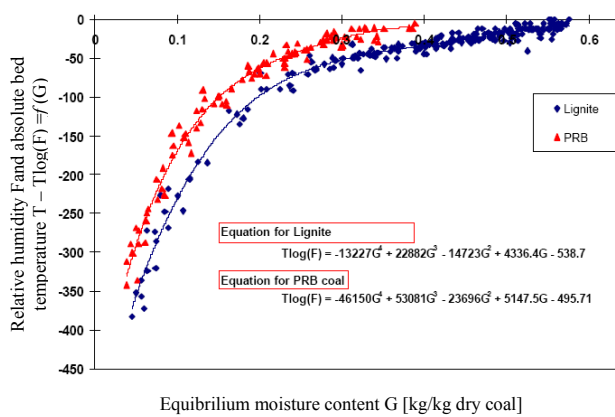


Поређење кинетике сушења одређене рачунски и експериментом за лигнит North Dakota на температури ваздуха 66 °C

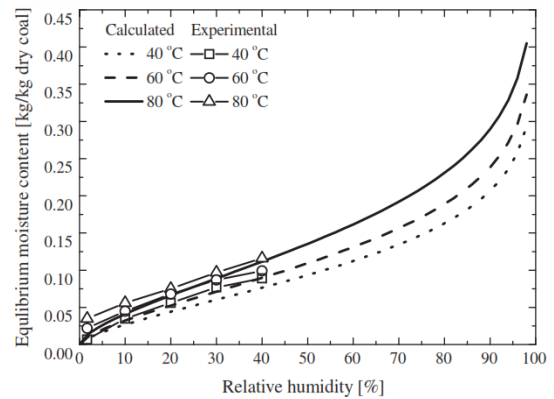


Поређење кривих сушења мрког угља Loy Yang добијених експериментом и прорачуном за пет брзина ваздуха

Слика 7.1 Кинетика сушења лигнита North Dakota и суббитуминозног угља Powder River Basin (PRB) [28] и мрког угља LoyYang [13] у флуидизованом слоју



Изотерма десорпције за лигнит North Dakota и суббитуминозни угаљ Powder River Basin (PRB)



Изотерме десорпције за мрког угља Loy Yang добијених експериментом и математичким моделом Dan-a и Nelson-a

Слика 7.2 Изотерма десорпције лигнита North Dakota и PRB угља [28] и угља LoyYang [13]

Експериментална испитивања су извршена на апаратури за сушење зрнастих и прашкастих материјала ваздухом у непокретном и флуидизованом слоју Sherwood Fluid Bed Dryer 501, која је додатно опремељена мерним уређајима за мерење протока, температуре и релативне влажности ваздуха на улазу у апаратуру и унапређена аутоматским управљањем и записивањем података температуре и релативне влажности ваздуха на излазу из апаратуре помоћу рачунара. Сви мерни уређаји су еталонирани у овлашћеним акредитованим лабораторијама, у којима је одређена тачност мерења сваког мереног параметра. Контролно мерење протока ваздуха је урађено паралелним мерењем стандардном мерном блендом и анемометром са ужареном жицом и на улазу и на излазу из апаратуре. На овај начин, најпрецизније могуће су измерени сви релевантни параметри неопходни за одређивање промене средњег садржаја воде у материјалу током извођења експерименталног процеса сушења.

Мерење и израчунавање промене апсолутне влажности материјала током процеса сушења на основу биланса масеног протока ваздуха на улазу и излазу из апаратуре је проверавано непосредним мерењем масе узорка на дигиталној ваги пре и после сваког извођења експеримента.

### 7.2 Утицај величине честица угља и температуре предгревања ваздуха на брзину сушења узорка

Очигледно је да процес сушења треба да се одвија брже за случај мањих комада угља, због мањег отпора унутар честице (једначина 4.17), и због веће специфичне површине материјала која проузрокује интензивнији пренос воде са површине материјала у околни ваздух (једначина 4.18). Утицај величине честица на кинетику сушења није видно изражен за испитиване фракције лигнита Колубара које су коришћене у експерименталним испитивањима (слике 6.4 и 6.5). Разлог малог утицаја величине честица на процес сушења може се објаснити малим фракцијама честица лигнита које се релативно мало разликују по величини, чији су средњи еквивалентни пречници: 1,50 mm, 2,57 mm и 3,95 mm, неједнаком величином честица у узорку за исту фракцију, као и њиховом изразито



неправилном облику, који је углавном игличаст, тако да је једна димензија честице знатно већа у односу на друге две. Такође, један мањи број честица је фрагментирао током трајања процеса сушења.

С друге стране, сушење на вишој температури загрејаног ваздуха је брже због веће разлике између парцијалног притиска водене паре (влажност ваздуха) на површини материјала и парцијалног притиска водене паре у околном ваздуху (влажност ваздуха), једначине (4.18), (4.25) и (4.27).

Утицај температуре загрејаног ваздуха се може лако уочити код свих гранулација угља, и за сушење у непокретном слоју и за сушење у флуидизованом слоју, за оба испитивана протока (слике 5.17 - 5.25 и слике 6.3 – 6.5), односно, на вишој температури загрејаног ваздуха материјал се знатно брже суши.

Ако се добијене криве кинетике сушења лигнита Колубара, за три различите температуре ваздуха (60°C, 90°C и 120°C), упореде са кривама кинетике сушења мрког угља Лоу Јанг (слика 7.1), добијених за три различите температуре загрејаног ваздуха (које су нешто ниже 40°C, 60°C и 80°C), може се уочити сличан карактер промене садржаја влаге у материјалу, односно како се са повећањем температуре ваздуха процес сушења угља знатно брже одвија.

У оба случаја, и прорачуни и експерименти су изведени до унапред дефинисане вредности садржаја влаге материјала (по сувој основи) од око 0,2. Свакако, угаљ може да се суши до крајњег садржаја влаге који је мањи од ове вредности, све до равнотежне вредности садржаја влаге, што зависи од параметара ваздуха којим се материјал суши. Продужено сушење угља у циљу постизања равнотежног садржаја влаге, са становишта исплативости читавог процеса, укључујући накнадно сагоревање, нема много смисла. После процеса сушења угаљ се меша са врелим димним гасовима и меље у млинским постројењима, где наставља да се суши, а затим уводи у котао кроз горионике у аеросмешу са димним гасовима и воденом паром на температури од 150 °C до 200 °C и на тај начин губи још неколико додатних процената свог садржаја влаге.

### 7.3 Утицај промене протока ваздуха на брзину сушења узорка

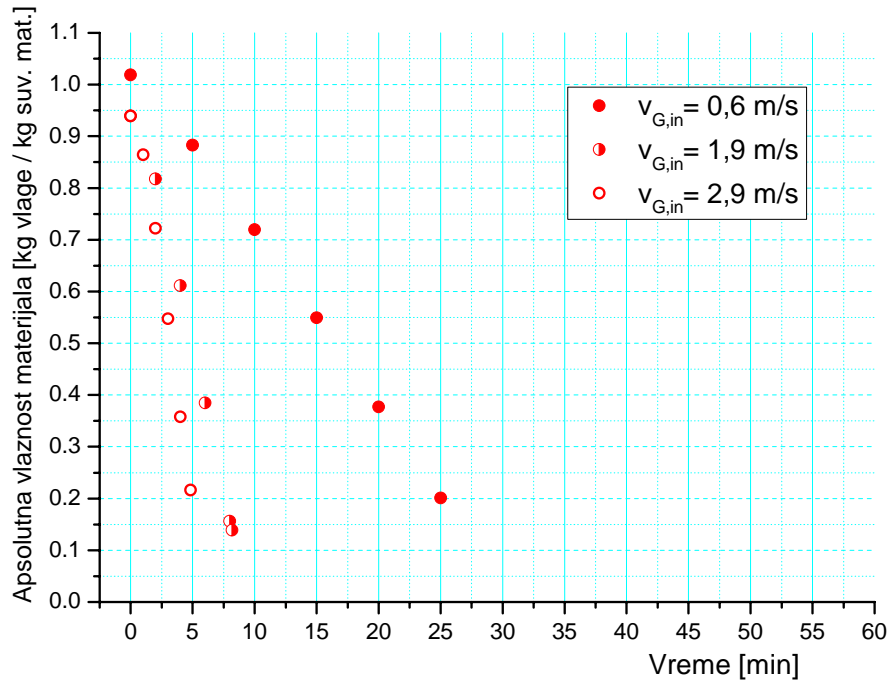
Експериментална испитивања кинетике сушења лигнита Колубара за три величине честица (1,50 mm, 2,57 mm и 3,95 mm), за три масе узорка (210g, 315 g и 420g) и три различите температуре ваздуха (60°C, 90°C и 120°C) извршене су на три различите брзине ваздуха испред слоја:

- при брзини ваздуха испред слоја материјала од 0,6 – 0,7 m/s извршено је сушење у непокретном/насутом слоју,
- при брзини ваздуха испред слоја материјала од 1,3 – 2,1 m/s извршено је сушење у флуидизованом слоју, код кога је брзина флуидизације нешто виша од минималне брзине флуидизације,
- при брзини ваздуха испред слоја материјала од 1,9 – 3,1 m/s извршено је инстензивније сушење у флуидизованом слоју, код кога је брзина флуидизације знатно виша од минималне брзине флуидизације.

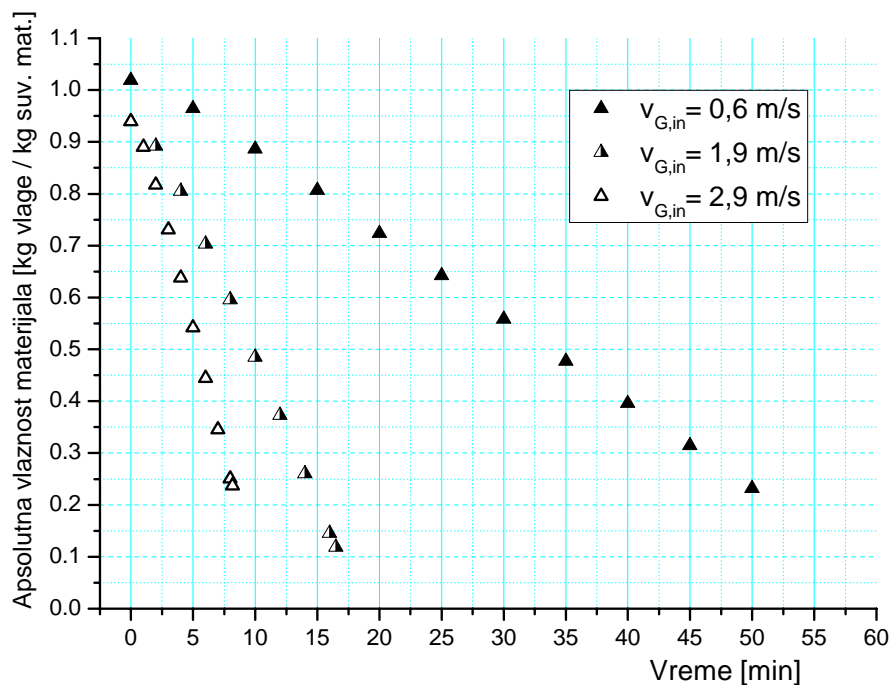
На сликама 7.3 и 7.4 приказане су криве кинетике сушења две масе узорка 210 g и 420 g за честице средњег пречника 2,57 mm при за различитим улазним брзинама ваздуха:  $v_{G,in1} = 0,6$  m/s (непокретни слој),  $v_{G,in2} = 1,9$  m/s (флуидизација мало већа од минималне брзине флуидизације),  $v_{G,in3} = 2,9$  m/s (инстензивнија флуидизација). Јасно се може уочити смањење времена сушења са повећањем улазне брзине ваздуха, а нарочито је јасна разлика између сушења у непокретном слоју и сушења у флуидизованом слоју.

На сликама 7.5 и 7.6 приказане су изабране промене средњег садржаја влаге лигнита Колубара са временом, добијене и експериментом и нумеричком симулацијом, у случају једног пречника угља (1,5 mm) за најнижу и највишу улазну температуру ваздуха (60 °C и 120 °C) и за две брзине ваздуха (1,3 m/s и 1,9 m/s). На основу резултата експеримената и нумеричких прорачуна, може се закључити да се смањењем протока ваздуха, тј. улазне брзине ваздуха, повећава време сушења. Очигледно је да процес сушење треба да се одвија брже за случај већих брзина ваздуха, због вишег коефицијента преноса топлоте  $\alpha_{S,G}$  (једначина 4.45), све док постоји довољан садржај влаге на површини чврстих материја.

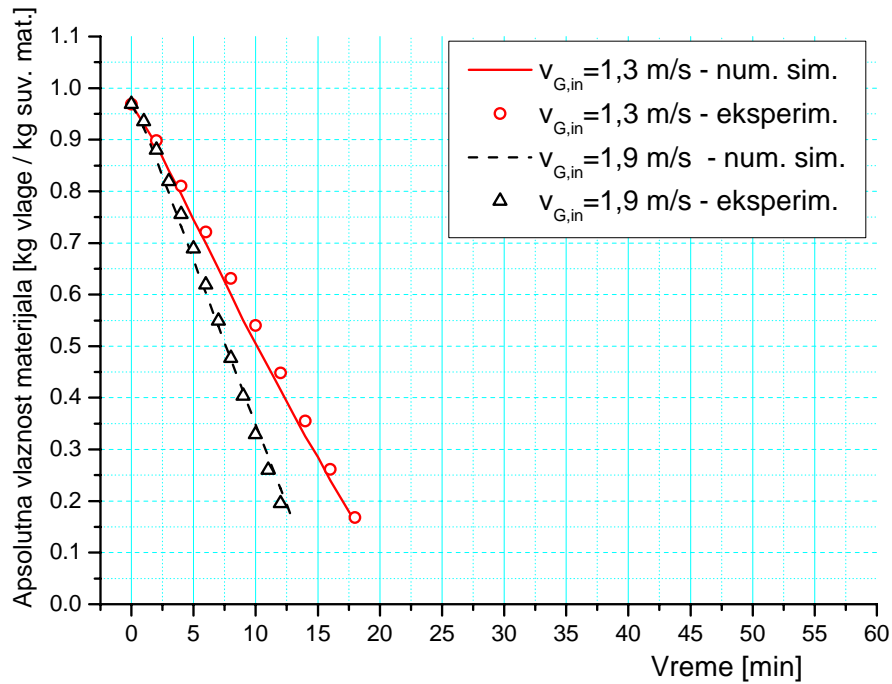
Исти закључак је извео аутор Matsushita са сарадницима одређујући криве сушења мрког угља Lou Yang за пет улазних брзина ваздуха (слика 7.1).



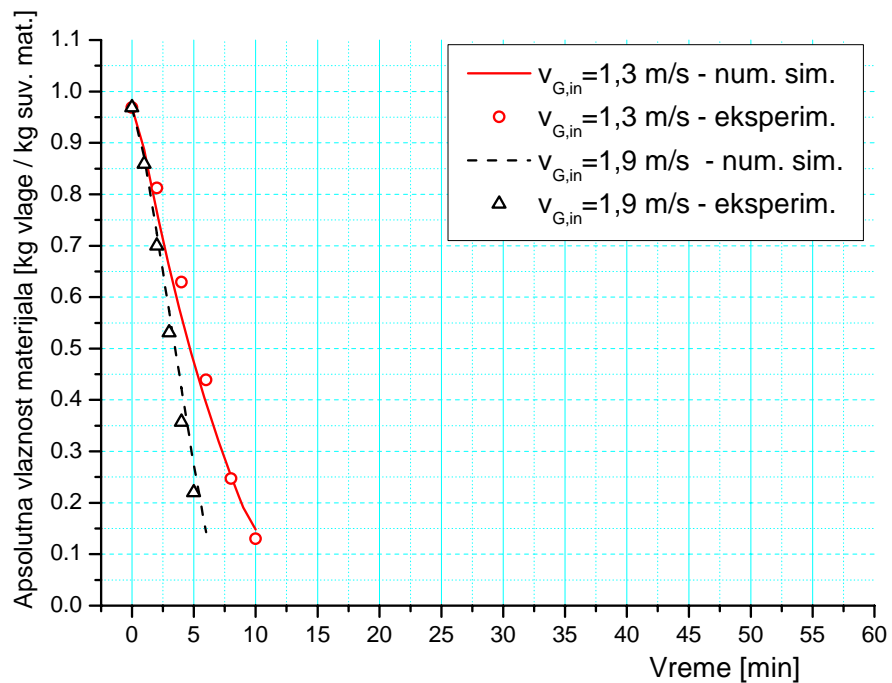
Слика 7.3 Кинетика сушења за масу узорка 210 g лигнита Колубара за три улазне брзине:  $v_{G,in1} = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $v_{G,in2} = 1,9 \text{ m/s}$ ,  $v_{G,in3} = 2,9 \text{ m/s}$ ;  $d_S = 2,57 \text{ mm}$ ,  $t_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $X_{01} = 1,019$ ,  $X_{02} = 0,939$ ,  $X_{03} = 0,939$ ;  $Y_{01} = 0,013$ ,  $Y_{02} = 0,009$ ,  $Y_{03} = 0,009$



Слика 7.4 Кинетика сушења за масу узорка 420 g лигнита Колубара за три улазне брзине:  $v_{G,in1} = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $v_{G,in2} = 1,9 \text{ m/s}$ ,  $v_{G,in3} = 2,9 \text{ m/s}$ ;  $d_S = 2,57 \text{ mm}$ ,  $t_{G,in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $X_{01} = 1,019$ ,  $X_{02} = 0,939$ ,  $X_{03} = 0,939$ ;  $Y_{01} = 0,013$ ,  $Y_{02} = 0,009$ ,  $Y_{03} = 0,009$



Слика 7.5 Кинетика сушења лигнита Колубара у флуидизованом слоју одређена експериментом и прорачуном за две различите улазне брзине:  $v_{G,in1} = 1,3$  m/s,  $v_{G,in2} = 1,9$  m/s;  $t_{G,in} = 60$  °C;  $X_0 = 0,969$ ,  $m_{S0} = 210$ g,  $d_S = 1,50$  mm,  $Y_0 = 0,008$



Слика 7.6 Кинетика сушења лигнита Колубара у флуидизованом слоју одређена експериментом и прорачуном за две различите улазне брзине:  $v_{G,in1} = 1,3$  m/s,  $v_{G,in2} = 1,9$  m/s;  $t_{G,in} = 120$  °C;  $X_0 = 0,969$ ,  $m_{S0} = 210$ g,  $d_S = 1,50$  mm,  $Y_0 = 0,008$

### 8. ЗАКЉУЧАК

У овој дисертацији, посвећеној проблематици сушења лигнита са великим садржајем влаге, коришћењем сопствених експерименталних података о кинетици сушења, приказан је поступак развијања математичког модела процеса сушења лигнита са великом садржајем влаге у непокретном и флуидизованом слоју.

За потребе истраживања кинетике сушења и проверавања ваљаности математичког модела коришћен је лигнит Колубара, код кога је садржај влаге од 45% до 52% у доставном стању. У ту сврху извршен је велики број експеримената у непокретном и флуидизованом слоју, од којих су представљени резултати 48 експеримената.

Да би се испитао процес сушења у непокретном/насутом и флуидизованом слоју и утицај најважнијих параметара на ефикасност процеса сушења експерименти су урађени за: три величине честица, три масе узорка, три температуре ваздуха, три брзине ваздуха испред слоја - прва за сушење у непокретном/насутом слоју, друга за сушење у флуидизованом слоју код кога је брзина флуидизације нешто виша од минималне брзине флуидизације и трећа за сушење у флуидизованом слоју код кога је брзина флуидизације знатно виша од минималне брзине флуидизације.

Развијени математички модел је заснован на идеји двофазног модела флуидизованог слоја који су први предложили аутори Kunii i Levenspiel, док је сам математички модел сушења оригинално развијен у Институту за нуклеарне науке "Винча". Модел се заснива на претпоставци да се суспензиона фаза флуидизованог слоја налази у стању минималне флуидизације, а вишак гаса од оног потребног за минималну флуидизацију, протиче кроз мехурасту фазу у виду гасних мехурова.

Основна концепција развијеног модела је да се процес сушења у суспензионој фази разматра као за непокретни слој честица, коришћењем концепта "коефицијент сушења", при чему се врши прорачун за елементарне слојеве (запремине) и уопштава за цео слој честица. Мешање честица које се јавља у флуидизованом слоју урачунава се преко дифузионог члана у диференцијалним једначинама.

Топлотна проводљивост непокретног слоја коју су дефинисали Zehner, Bauer и Schlünder је коришћена за дефинисање механизма преноса топлоте који се јављају у суспензионој фази флуидизованог слоја.

Утицај сва три облика преноса топлоте и супстанције (аксијални пренос топлоте, пренос топлоте између гаса и честица и пренос топлоте кроз честицу) су узети преко механизма топлоте који су обједињени у еквивалентном Nusselt-овом, односно Sherwood-овом критеријуму.

Модел је развијен како би се извршила анализа процеса сушења и истражио утицај агенса за сушење (топао ваздух, прегрејана пара, итд.), параметара агенса сушења (температура, влажност, проток) и параметара материјала (величина честица) на процес сушења угља, као и ефикасност процеса сушења. Неопходни параметри повезани са кинетиком сушења појединачне честице и равнотеже сорпције/десорпције испитиваног лигнита Колубара потврђени су и коришћени у обављеним прорачунима.

Поједностављењем основног модела флуидизације, представљеног системом једначина (4.6) - (4.12), може се израчунавати и процес сушења у непокретном слоју:

- уклањањем једначина одржања садржаја влаге гаса (4.6) и енталпије гаса (4.9), које се односе на мехурасту фазу,
- поједностављењем једначина одржања садржаја влаге гаса (4.7) и енталпије гаса (4.10) у суспензионој фази, тј. брисањем "изворних чланова" који се односе на мехурасту фазу (садрже коефицијенте  $(K_{VE})_V$  и  $(H_{VE})_V$ ),
- поједностављењем једначина одржања садржаја влаге честица (4.8) и енталпије честица (4.11) у суспензионој фази, тј. брисањем "дифузионих чланова" (који садрже коефицијенте  $D_{eff}$ , односно  $\lambda_{eff}$ ).

Истраживања су показала да утицај величине честица на кинетику сушења није видно изражен за испитиване мале фракције лигнита Колубара, које су коришћене у експерименталним испитивањима. Повећањем температуре загрејаног ваздуха лигнит Колубара се знатно брже сушио. Повећањем улазне брзине ваздуха, односно протока ваздуха, очигледно је видљиво смањење времена сушења, нарочито између сушења у непокретном слоју и сушења у флуидизованом слоју.

Добијени резултати кинетике сушења лигнита Колубара су упоређени са резултатима кинетике сушења три врсте нискоквалитетних угљева других аутора из доступне литературе. Код свих аутора добијен је исти облик криве кинетике сушења угља у флуидизованом слоју, као и слични закључци анализе процеса сушења у погледу утицаја параметара агенса сушења (ваздуха) на процес сушења и његову ефикасност.

Овим приступом истраживања је могуће, извођењем једноставних експеримената процеса сушења у непокретном слоју, прорачунавати процесе сушења у флуидизованом слоју, односно пројектовати сушаре у флуидизованом слоју са дефинисаним временом трајања процеса и садржајем влаге у осушеном материјалу.

У случају сушења запаљивих материјала ограничавајући фактор сушења ваздухом је ниска температура услед високог садржаја кисеоника, чиме се даје предност употреби прегрејане водене паре као агенса сушења.

Употребом агенса сушења са већим топлотним капацитетом повећава се брзина сушења материјала. Водена пара поседује већи топлотни капацитет у поређењу са влажним ваздухом, рачунајући при томе само на осетну топлоту коју је могуће добити хлађењем оба агенса сушења у истим температурним границама, а не и на латентну топлоту кондензације водене паре.

На основу претходно наведеног, може се констатовати да је научни допринос ове дисертације остварен у:

- унапређењу нумеричко-аналитичког модела процеса сушења материјала у непокретном и флуидизованом слоју. При томе, поред унапређења овог модела у смислу емпиријског одређивања параметра који следе из експериментално одређених изотерми сорпције/десорпције сушења за лигните са великим садржајем влаге, математички модел је унапређен и уградњом Zehner/Bauer/Schlünder модела за одређивање ефективне топлотне проводљивости непокретног слоја. Унапређени математички модел обухвата утицај сва три механизма преноса топлоте на простирање топлоте у насутом/непокретном слоју.

- добијању репрезентативних експерименталних података из процеса сушења лигнита у непокретном и флуидизованом слоју, који су послужили за верификацију формираног математичког модела.
- стварању јединствене научне базе експерименталних података, али и података који се могу користити развијеним математичким моделом, а могу послужити при пројектовању постројења за предсушење на домаћим термоенергетским постројењима, односно подацима о промени садржаја влаге у ситнијим честицама лигнита Колубара (испод 5 mm) током процеса сушења у флуидизованом слоју при различитим утицајима параметара агенса сушења (температура и проток).
- унапређењу експерименталне инсталације и експерименталног поступка одређивања промене садржаја влаге у материјалу.

Такође, може се констатовати да су установљене чињенице истраживања корак напред и воде ка унапређењу постојећих података о карактеристикама процеса сушења лигнита са високим садржајем влаге и могућности увођења процеса предсушења на домаћим термоенергетским постројењима чиме би се, повећањем енергетске ефикасности у процесу сагоревања осушеног лигнита, смањила емисија угљен-диоксида у околину.

Поред тога, побољшањем квалитета лигнита у термоблоковима се спречавају негативни утицаји: смањење капацитета млинских постројења, погоршање финоће млевења, укључивање горионика течног горива за стабилизацију сагоревања, повећање сопствене потрошње електричне енергије, снижење степена корисности котловског постројења и др.

Развијени нумеричко-аналитички модел поседује велику примењивост с обзиром да је конципиран за симулацију процеса сушења у непокретном и у флуидизованом слоју за различите агенсе сушења и различите врсте фосилних горива са високим садржајем влаге.

Даљи развој математичког модела, чиме би се постигла већа тачност садашњег модела, требао би обухвати размену топлоте између слоја материјала и зида посуде, утицај честица присутних у мехурастој фази код флуидизованог слоја и промену параметара процеса сушења дуж друге координате слоја материјала, тј.



развој нестационарног дводимензионалног математичког модела преноса топлоте и супстанције током процеса сушења.

Даља истраживања процеса сушења лигнита Колубара у непокретном и флуидизованом слоју требало би извршити прегрејаном воденом паром као агенсом сушења. Надоградња апаратуре за сушење прегрејаном воденом паром на различитим притисцима би имала велики допринос истраживању овог концепта сушења и валидацији математичког модела.

Поред тога, будући рад би требало усредсредити на експериментално и нумеричко истраживање нових могућности смањења потрошње енергије, као што је нова технологија сушења сопственом рекуперацијом топлоте (Self-Heat Recuperation Technology) коју су предложили Aziz и др. [93], којом се рекуперацију и осетна и латентна топлота.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Levy E., Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants, Quarterly report for period July 1, 2005 to September 30, 2005.
- [2] Levy E., Caram H., Yao Z., Wei Z. and Sarunac N., Kinetics of Coal Drying in Bubbling Fluidized Beds, Proceedings Fifth World Congress on Particle Technology, Orlando, Florida, April 2006.
- [3] Spliethoff H., Maier J., Hocquel M., Kluger F., Hein K.R.G., König J., Derichs W. and Meschbiz A., Effect of Pre-Drying on Combustion Behaviour and Boiler Design, Pre-Drying Process for the Efficient and Clean Utilization of Brown Coal in the Enlarged EU Market, Athens, Greece, 23. April 1999.
- [4] Skenderidis G., Future trends for the Lignite Utilization for Power Generation in Greece, Pre-Drying Process for the Efficient and Clean Utilization of Brown Coal in the Enlarged EU Market, Athens, Greece, 23. April 1999.
- [5] Tchorbadijsky I. and Todoriev H., Experience and Trends in Bulgaria in Using Dried Lignite for Power Generation, Pre-Drying Process for the Efficient and Clean Utilization of Brown Coal in the Enlarged EU Market, Athens, Greece, 23. April 1999.
- [6] Williams A., Pourkashanian M., Jones J. M., Skorupska N., Combustion and Gasification of Coal, Taylor&Fransis, New York, 1999, ISBN 1P56032-549-6.
- [7] Allardice D. J. and Young B. C., Utilization of Low Rank Coals.
- [8] Стефановић П., Стакић М., Цветиновић Д., Ерић М.,и др., Анализа услова и могућности примене сушења лигнита у циљу повећања енергетске ефикасности и заштите животне средине у термоелектранама ЈП ЕПС-а, НИВ – ЛТЕ – 469, Винча, мај 2011.
- [9] Бркић Љ., Прилог избору система сушења домаћих лигнита за котлове блокова велике снаге, Докторска теза, Машински факултет Универзитета у Београду, 1980.
- [10] Klutz H.-J., Moser C. and Block D., WTA Fine Grain Drying: Module for Lignite-Fired Power Plants of the Future – Development and Operating Results of the Fine Grain Drying Plant, VGB PowerTech 11/2006, pp. 57÷61.

- [11] Bullinger C. and Ness M., Coal Creek Prototype Fluidized Bed Coal Dryer: Performance Improvement, Emissions Reduction, and Operating Experience, EPRI Program 66 Coal Fleet for Tomorrow, San Francisco, CA February 27, 2007.
- [12] Prethodna studija opravdanosti sa generalnim projektom termoenergetskog postrojenja za sagorevanje kolubarskog lignita niske toplotne moći u kotlu sa cirkulacionim fluidizovanim slojem', partija 2 (Analiza opravdanosti otkopavanja niskokvalitetnih partija uglja, Izveštaj za JP EPS, DSI) Vattenfall Europe Mining AG i Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Februar, 2010.
- [13] Kim H. S., Matsushita Y., Oomori Motohira, Harada T., Yoon S. H., Mochida I., Miyawaki J., Fluidized bed drying of Loy Yang brown coal with variation of temperature, relative humidity, fluidization velocity and formulation of its drying rate, Fuel 105 (2013), pp 415-424.
- [14] Mitsuhashi N, Matsushita Y, Harada T. Drying of brown coal with Halogen heatsource and its formulation. Jpn Soc Mech Eng 2011:247–8.
- [15] Mitsuhashi N, Matsushita Y, Harada T. The drying characteristics of Brown coal under various temperature conditions and its drying rate formation. IN: HTSJ. 48th, Symposium; 2011. p. 389–90.
- [16] Matsushita Y, Mitsuhashi N, Matsuda S, Harada T, Kumada N. Drying of Brown coal using moisture analyzer with halogen heat source and simple drying rate equation. Kagaku Kogaku Ronbunshu. 2012;38(2):123–8.
- [17] Allardice D. J., Evans DG. The brown coal/water system: Part 2. Water sorption isotherms on bed-moist Yallourn brown coal. Fuel 1971;50(3):236–53.
- [18] Allardice D. J., The water in brown coal. In: Durie RA, editor. The science of Victorian brown coal. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1991. p. 102–50.
- [19] Henderson S. M., A basic concept of equilibrium moisture. Agr Eng 1952;33:29–33.
- [20] Pakowski Z, Adamski R, Kokocinska M, Kwapisz B. Generalized desorption equilibrium equation of lignite in a wide temperature and moisture content range. Fuel 2011;90:3330–5.
- [21] Viswanathan K. Model for continuous drying of solids in fluidized/spouted beds. Can J Chem Eng 1986;64:87–95.
- [22] Chandran AN, Rao SS, Varma YBG. Fluidized bed drying of solids. AIChE J 1990;36:29–38.

- [23] Kannan CS, Rao SS, Varma YBG. A kinetic model for drying of solids in batchfluidized beds. *Ind Eng Chem Res* 1994; 33:363–70.
- [24] Chen Z, Agarwal PK, Agnew JB. Steam drying of coal. Part 2. Modeling theoperation of a fluidized bed drying unit. *Fuel* 2001;80:209–23.
- [25] Wang W. C., Laboratory investigation of drying process of Illinois coals. *PowderTechnol* 2012;225:72–85.
- [26] Ng WK, Tan RBH. Case study: optimization of an industrial fluidized bed dryingprocess for large Geldart type D nylon particles. *Powder Technol*2008;180:289–95.
- [27] Levy E., Caram H., Yao Z., Wei Z. and Sarunac N., Kinetics of Coal Drying in Bubbling Fluidized Beds, *Proceedings Fifth World Congress on Particle Technology*, Orlando, Florida, April 2006.
- [28] Levy E., Sarunac N., Bilirgen H. and Caram H., Use of Coal Drying to Reduce Water Consumed in Pulverized Coal Power Plants, Final report, December 2, 2002 to March 31, 2006, DOE Award Number DE-FC26-03NT41729.
- [29] Allardice D. J. and Young B. C., Utilization of Low Rank Coals.
- [30] Kakaras E., Grammelis P., Agraniotis M., Schlechter C., Nikolaidis I. and Papapavlou Ch., Experimental Investigation on the Combustion Behavior of Greek Brown Coal with Varying Moisture Content, *Third International Conference on Clean Coal Technologies for our Future (CCT 2007)*, Cagliari, Sardinia, Italy, 15÷17. May 2007.
- [31] Kakaras E., Ahladas P. and Syrmopoulos S., Computer Simulation Studies for the Integration of an External Dryer into a Greek Lignite-Fired Power Plant, *Fuel* 81 (2002) 583÷593.
- [32] Papapavlou Ch., Nikolaidis I. and Sokratiduo A., Commercial-Scale Testing of a Fluidized-Bed Drying Plant for Highly Efficient Lignite-Fired Power Plants (DRYCOAL), *Midterm Technical Report covering PPC's activities from 01.10.2004 to 31.12.2006*, Athens, March 2007.
- [33] Kakaras E., Grammelis P., Agraniotis M., Karabinis E., Doukelis A. and Koumanakos A., Commercial-Scale Testing of a Fluidized-Bed Drying Plant for Highly Efficient Lignite-Fired Power Plants (DRYCOAL), *Midterm Technical*

- Report covering NTUA-LBS's activities from 01.10.2004 to 31.12.2006, Athens, March 2007.
- [34] Atsonios K., Violidakis I., Agraniotis M., Grammelis P., Nikolopoulos N., Kakaras E., Thermodynamic analysis and comparison of retrofitting pre-drying concepts at existing lignite power plants, *Applied Thermal Engineering* 74 (2013) 165-173.
- [35] Klutz H.-J., Moser C. and Block D., WTA Fine Grain Drying: Module for Lignite-Fired Power Plants of the Future – Development and Operating Results of the Fine Grain Drying Plant, *VGB PowerTech* 11/2006, pp. 57÷61.
- [36] Schwending F., Klutz H.-J. and Ewers J., The Dry Lignite-Fired Plant, *VGB PowerTech* 12/2006, pp. 51÷57.
- [37] The WTA Technology – An Advanced Method of Processing and Drying Lignite, RWE Brochure, RWE Power Aktiengesellschaft, Essen – Köln.
- [38] Ahladas P. and Kakaras E., Current State of Pre-Drying Technologies, Proceedings, Pre-Drying Process for the Efficient and Clean Utilization of Brown Coal in the Enlarged EU Market, Athens, Greece, 23. April 1999.
- [39] Heinonen O. and Jokela P., Fortum's Steam Drying Technologies, Pre-Drying Process for the Efficient and Clean Utilization of Brown Coal in the Enlarged EU Market, Athens, Greece, 23. April 1999.
- [40] Hoehne O., Erhöhung der Kraftwerkseffizienz durch Druckaufgeladene Dampf-Wirbelschicht-Trocknung (DDWT), CEBra – Centrum für Energietechnologie Brandenburg e.V., Brandenburgische Kraftwerks-Forum, TFH Wildau, 05.11.2008.
- [41] Karthikeyan M., Zhonghua W., Mujumdar A. S., Low-Rank Coal Drying Technologies – Current Status and New Developments, *Drying Technology* 27(2009) 3, 403÷415.
- [42] Devahastin S., Mujumdar A. S., Classification and Selection of Industrial Dryers; Chapter 2 in S. Devahastin (Ed.) *Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying*, Exergex, Montreal, 2000.
- [43] Mujumdar A. S., *Handbook of Industrial Drying*, CRC Press, 2007.
- [44] Jangam S. V., Mujumdar A. S., Coal Dehydration – A compilation of relevant publication and technical reports, <http://www.arunmujumdar.com/e-books.htm>.
- [45] Brown Coal Drying Technologies, APP Joint Meeting of Cleaner Fossil Energy and Power Generation and Transmission Task Forces, 1. April, 2008.

- [46] Fleissner H., The Drying of Fuels and the Austrian Coal Industry, Sonderdruck Sparwirtschaft, 10 and 11, 1927.
- [47] Thiess Pty Ltd., Corporate website for Thiess: an Australian Mining and Construction Company [www.thiess.com.au](http://www.thiess.com.au).
- [48] Kraemer I., Exergen's Continuous Hydro-Thermal Dewatering (CHTD) of Brown Coal, SD07 A Climate for Change, Sustainable Development Conference, 29 Oct ÷ 2 Nov 2007, Cairns, Queensland, Australia.
- [49] van Meel, Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air, *Chem. Eng. Sci.*, 9 (1958), 36÷44.
- [50] Traub D. A., Drying Files. [www.process-heating.com](http://www.process-heating.com).
- [51] van Deventer H. C., Industrial Superheated Steam Drying, TNO-report, R 2004/239, June 2004.
- [52] Топић Р., Основе Пројектовања, Прорачуна и Конструисања Сушара, Научна књига, Београд, 1989.
- [53] van Meel, D.A., Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chemical Engineering Science*, 9 (1958), pp. 36-44.
- [54] Tsotsas E., Measurement and modeling of intraparticle drying kinetics: A review, *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International drying symposium (IDS '92)*, Montreal, 1992, pp. 17-41.
- [55] Luikov A.V., *Drying theory*, 1st ed., Energiya, Moscow, 1968 (in Russian)
- [56] Milojevic D., Stefanovic M., Convective drying of thin and deep beds of grain, *Chemical Engineering Communication*, 13 (1982), pp. 261-269.
- [57] Palancz B., A mathematical model for continuous fluidized bed drying, *Chemical Engineering Science*, 38 (1983), pp. 1045-1059.
- [58] Lai F.S., Chen Y., Fan L.T., Modelling and simulation of a continuous fluidized-bed dryer, *Chemical Engineering Science*, 41 (1986), pp. 2419-2430.
- [59] Li M., Duncan S., Dynamical model analysis of batch fluidized bed dryers, *Particle & Particle Systems Characterization*, 25 (2008), pp. 328-344.
- [60] Wang H.G., Dyakowski T., Senior P., Raghavan R.S., Yang W.Q., Modelling of batch fluidized bed drying of pharmaceutical granules, *Chemical Eng. Science*, 62 (2007), pp. 1524-1535.

- [61] Wang H.G., Yang W.Q., Senior P., Raghavan R.S., Duncan S.R., Investigation of batch fluidized bed drying by mathematical modelling, CFD simulation and ECT measurement, *AIChE Journal*, 54 (2007), pp. 427-444.
- [62] Groenewold H., Tsotsas E., A new model for fluid bed drying, *Drying Technology*, 15 (1997), pp. 1687-1698.
- [63] Temple S. J., van Boxtel A. J. B., Modelling of fluidized-bed drying of black tea, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74 (1999), pp. 203-212.
- [64] Syahrul S., Dincer I., Hamdullahpur F., Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles, *International Journal of Thermal Science*, 42 (2003), pp. 691-701.
- [65] Tsotsas E., From single particle to fluid bed drying kinetics, *Drying Technology*, 12 (1994), pp. 1401-1426.
- [66] Zahed A. H., Zhu J-X., Grace J. R., Modelling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers, *Drying Technology*, 13 (1995), pp. 1-28.
- [67] Burgschweiger J., Tsotsas E., Experimental investigation and modelling of continuous fluidized bed drying under steady-state and dynamic conditions, *Chemical Engineering Science*, 57 (2002), pp. 5021-5038.
- [68] Kunii D., Levenspiel O., *Fluidization Engineering*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.
- [69] Patankar S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere P.C., New York, 1980.
- [70] Stakic M., Stefanovic M., Numerical simulation of corn drying in fixed bed, *agricultural Engineering*, 1 (1995), 1-2, pp. 17-25.
- [71] Stakic M., Numerical simulation of real materials convective drying in fixed bed, *Thermal Science*, 1 (1997), 2, pp. 59-70.
- [72] Stakic M., Numerical study on hygroscopic capillary-porous material drying in a packed bed, *Thermal Science*, 4 (2000), 1, pp. 25-41.
- [73] Stakic M., Tsotsas E., Model-based analysis of convective grain drying process, *Drying Technology*, 23 (2005), 9-11, pp. 1895-1908.
- [74] Stakić M., Cvetinović D., Škobalj P., Spasojević V., An initial study on feasible treatment of Serbian lignite through utilization of low-rank coal upgrading

- technologies, *Chemical Engineering Research and Design*, 92 (2014), pp. 2383-2395.
- [75] Darton R., La Nause R., Davidson J., Harrison D., 1977. Bubble growth due to coalescence in fluidized beds. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 55, 274-280.
- [76] Стефановић М., Каневче Г., Урошевић М., Нешић С., Гецић Б., 1983. Истраживање конвективног сушења Колубарског лигнита и његовог квалитета, Симпозијум употреба угља у термоенергетици, Београд
- [77] Hirschmann C., Fyhr C., Tsotsas E., Kemp I.C., 1998. Comparison of two basis methods for measuring drying curves: thin layer method and drying channel. *Proc. of the 11th International drying symposium (IDS '98)*. Halkidiki, 224-231.
- [78] Tsotsas E., *VDI-Wärme-atlas*, 9th ed., Section Dee 9, Springer, Berlin, 2002.
- [79] Tsotsas E., *VDI-Wärme-atlas*, 9th ed., Section Mh 6., Springer, Berlin, 2002.
- [80] Gnielinski, *VDI-Wärme-atlas*, 9th ed. Section Gj 1., Springer, Berlin, 2002.
- [81] Вороњец Д., Козић Ђ., Влажан ваздух, термодинамичке особине и примена, СМЕИТС, Београд, октобар 1980.
- [82] The EngineeringToolBox, [www.EngineeringToolBox.com](http://www.EngineeringToolBox.com), Water Vapor and Saturation Pressure in Humid Air, Saturation Pressure of Water Vapor.
- [83] Ерић М., Стефановић П., Марковић З., Периодично мерење емисије штетних и опасних материја у ваздух на блоковима А1, А2 и А3 ТЕ "Никола Тесла" у Обреновцу, Технички извештајНИВ ЛТЕ 559, Институт за нуклеарне науке "Винча", Винча, децембар 2014.
- [84] Ерић М., Стефановић П., Марковић З., Периодично мерење емисије штетних и опасних материја у ваздух на блоку А2 ТЕ "Никола Тесла" у Обреновцу, II серија мерења, Технички извештајНИВ ЛТЕ 560, Институт за нуклеарне науке "Винча", Винча, децембар 2014.
- [85] Stefanovic P., Eric M., Markovic Z., Particulate Emission Guarantee Test B of the Upgraded ESPat Unit B1 of TPP "Nikola Tesla B", Technical report NIV LTE 548, Version 2.0, Institute of Nuclear Sciences "Vinča", Vinča, March 2014.
- [86] DINAMIC MOISTURE ANALYSIS HOW IT WORKS, DMA Excel Analysis – How it works (Rev 3-13/10/05), QAQC LAB, [www.qclabequipment.com](http://www.qclabequipment.com).



- [87] Dakić D., Grubor B., Oka S., Isledovanie načala psevdoožiženja i rasširenia sloa krupnijih čestic, Processji perenosa v vjisoko-temperaturnjih i himičeskih reagiruoših potokah, Sbornik naučnih trudov, Novosibirsk, 1982.
- [88] Ока С., Сагоревање у флуидизованом слоју – Процеси и примена, Југословенско друштво термичара, Београд, 1994.
- [89] Стакић М., Пренос топлоте и материје при сушењу прашкастих и ситнозрнастих материјала применом виброфлуидизације, докторска дисетарција, Београд, 1993.
- [90] Ока С., Грубор Б., Дакић Д., Илић М., Белошевић С., Мановић В., Арсић Б., Баришић В., Црномарковић Н., Младеновић Р., Паприка М., Ерић М., Ока Н., Истраживање могућности примене сагоревања у циркулационом флуидизованом слоју (ЦФС) у котловима у Електропривреди Србије, Студија, Институт за нуклеарне науке "Винча", Београд, 2006.
- [91] Jovanović R., Cvetinović D., Erić M., Rasuo B., Adžić M., Sensitivity analysis of different kinetic factors for numerical modeling of Serbian lignite devolatilization process, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 72 (2014) 489–500.
- [92] Belosevic S., Sijercic M., Oka S., Tucakovic D., Three-dimensional modeling of utility boiler pulverized coal tangentially fired furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 3371–3378.
- [93] Erić M., Stakić M., Banjac M., Fluid Bed Drying as Upgrading Technology for Feasible Treatment of Kolubara Lignite, *Thermal Science*, Vol 20 (suppl. 1):167-181, 2016.
- [94] Aziz M., Fushimi C., Kansha Y., Mochidzuki K., Kaneko S., Tsutsumi A., Matsumoto K., Hashimoto T., Kawamoto N., Oura K., Yokohama K., Yamaguchi Y., Kinoshita M., Innovative energy-efficient biomass drying based on self-heat recuperation technology, *Chemical Engineering Technology*, 34 (2011), pp. 1095-1103.

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Мр Милић Ерић, дипл. инж. маш, рођен је 20.03.1970. године у Београду, где је завршио основну школу и IV београдску гимназију. Дипломирао је на Машинском факултету Универзитета у Београду 2000. године на Одсеку за термоенергетику са просечном оценом у току студија 8,52 (осам и 52/100). Дипломски рад из предмета Парне турбине са темом "Одређивање критичног броја обртаја ротора парних турбина" одбранио је са оценом 10 (десет). Последипломске магистарске студије уписао је школске 2001/02. године, такође на Машинском факултету у Београду, на Одсеку за термоенергетику. Магистарску тезу под насловом "Прилог отклањању пулзативног сагоревања у енергетским котловима" успешно је одбранио 2008. године и стекао академски назив магистра техничких наука у области машинства.

Као истраживач-приправник запослен је у Лабораторији за термотехнику и енергетику, Института за нуклеарне науке "Винча" од 2001. године. Учествовао је на више пројеката Лабораторије за термотехнику и енергетику из области енергетске ефикасности и технолошког развоја.

Досадашњи рад кандидата може се сврстати у следеће научно-истраживачке и стручне области:

1. Сагоревање у флуидизованом слоју,
2. Сагоревање обновљивих извора енергије,
3. Испитивање термоенергетских постројења у циљу повећање ефикасности рада и смањења аерозагађења у ваздух,
4. Примена плазма технологија у енергетици и за синтезу ултрадисперзних и керамичких прахова.

Од 2008. године руководи Одељењем за екологију, акредитоване Лабораторије за горива и термотехничка испитивања, које се бави испитивањима из области мерења емисије загађујућих материја у ваздух.

Објавио је више радова који су публиковани на међународним конференцијама, у водећим часописима националног значаја и истакнутим међународним часописима.

Ожењен је и има двоје деце.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а мр Милић Ерић

број индекса - \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**ПРОЦЕСИ СУШЕЊА ЛИГНИТА СА ВЕЛИКИМ САДРЖАЈЕМ ВЛАГЕ У  
НЕПОКРЕТНОМ И ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 06.07.2016.

Ерић Милић



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора мр Милић Ерић

Број индекса -

Студијски програм докторске студије

Наслов рада Процеси сушења лигнита са великим садржајем влаге у  
непокретном и флуидизованом слоју

Ментор проф др Милош Бањац, Универзитет у Београду Машински факултет

Потписани/а мр Милић Ерић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 06.07.2016.

Ерић Милош



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ПРОЦЕСИ СУШЕЊА ЛИГНИТА СА ВЕЛИКИМ САДРЖАЈЕМ ВЛАГЕ У  
НЕПОКРЕТНОМ И ФЛУИДИЗОВАНОМ СЛОЈУ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 06.07.2016.

Ернст Милош



1. **Ауторство** - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално**. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално – без прераде**. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима**. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прераде**. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство - делити под истим условима**. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.