

Zníženie energetickej a environmentálnej zát'aže výroby železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva odpadnou biomasou

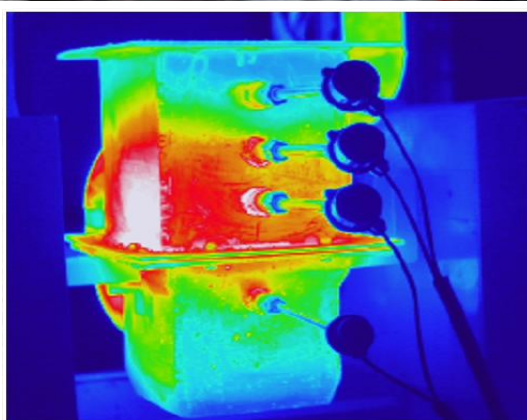


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Číslo projektu : APVV-16-0513

Doba riešenia: 1.7. 2017 – 30.06.2020

3. časť – r. 2019



Riešitelia:

prof. Ing. Mária Fröhlichová, CSc.
vedúca projektu,

doc. Ing. Jaroslav Legemza, PhD.,

doc. Ing. Róbert Findorák, PhD.,

Ing. Martina Džupková, PhD. ,

Ing. Roland Mežibrický.

Hlavné ciele projektu

- teoretické štúdium nových poznatkov použitia biomás v rámci aglomerácie vo svete,
- komplexná materiálová analýza nových druhov biomasy,
- optimalizácia podmienok zbaľovania a spekania s definovaným typom biomasy,
- zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby železoruďného aglomerátu,
- návrh technického riešenia aplikácie potenciálnych druhov biomasy v podmienkach SR



v rámci výroby Fe aglomerátu



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

**Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železoruďného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513**

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Závery teoretického štúdia nových poznatkov použitia biomasy v aglomeračnom procese – 1.časť (r. 2017)

- úplná náhrada prachového koksu v aglomerácii biomasou nie je možná



je možné nahradiť 10-40% prachového koksu, existuje potenciál pre zníženie emisií a zvýšenie produktivity

- potreba ďalšieho skúmania



vplyvu vlastností vstupných druhov biomasy na aglomeračný proces, štúdium termodynamiky a kinetiky spaľovania biomasy

- pre aglomeračný proces sa javí ako najvhodnejšia odpadná biomasa



piliny z dendromasy, zvyšky z fytomasy, lignínové zložky



Závery z komplexnej materiálovej analýzy nového druhu biomasy

2.časť (r. 2018)

- hydrolyzovaný lignin sa javí ako vhodná čiastočná náhrada koksu v aglomeračnom procese

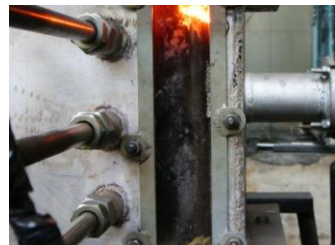
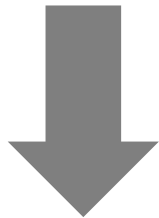


lignin má nižšiu výhrevnosť ako prachový koks, ale vyššiu ako drevné piliny
má výrazne nižší obsah popola – s nižšou teplotou tavenia
má nižší obsah dusíka a síry



Závery z horenia nového druhu biomasy – 2.časť (r. 2018)

- z testovaní horenia ligninu v podmienkach simulácie aglomeračnej vrstvy možno vyvodit' nasledujúce poznatky



- rýchlosť horenia ligninu narastá so zvyšovaním podtlaku
- granulometria ligninu ovplyvňuje celkovú priedušnosť zmesi a podmienky prívodu oxidačného činidla na reakčný povrch ligninu
- testovaná biomasa (lignin) horí intenzívnejšie v celom rozsahu použiteľnej zrnitosti v porovnaní s aglomeračným koksom



Štruktúra 3. časti projektu (r. 2019)

- tvorba modelu materiálovo-tepelnej bilancie procesu horenia koksu a spekania aglomeračnej vsádzky za použitia rôznych druhov biomasy
- optimalizácia metodiky na úpravu granulometrického zloženia nových druhov biomasy (napr. lignin, konope) pomocou dezintegrátorov drevnej a rastlinnej biomasy a optimalizácia podmienok zbaľovania aglozmesi
- vysokoteplotné spekanie a optimalizácia podmienok spekania s definovaným typom biomasy - **lignin**



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Model materiálovo-tepelnej bilancie

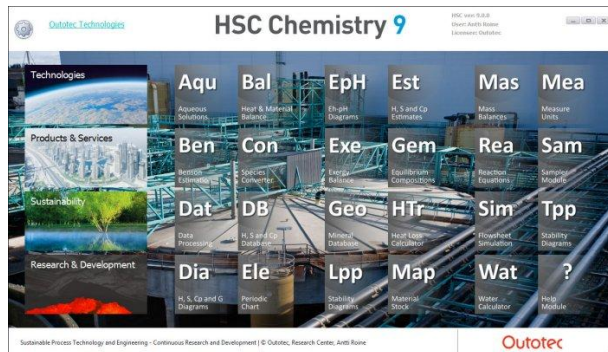


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

**Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513**

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

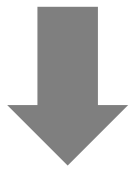
Termodynamický model



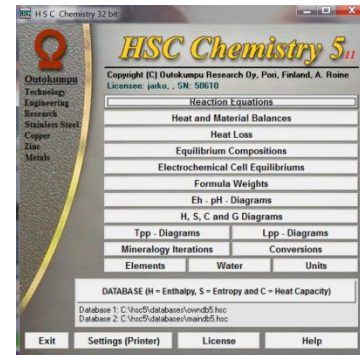
program HSC Chemistry 9



modul Equilibrium Calculations



horenie biomasy



program HSC Chemistry 5.11



modul Heat and Material Balance



materiálovo-teplná bilancia horenia biomasy
materiálovo-teplná bilancia výroby aglomerátu



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej zát'áže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Termodynamický model

- termodynamické rovnice z programu HSC Chemistry sa použili na získanie potrebných dát pre príslušné chemické reakcie, ktoré prebiehajú v procese spekania,
- všetky termochemické dáta (**tepelná kapacita, entalpia, zmena Gibbsovej energie**) sa vypočítali zo základných údajov príslušných chemických reakcií v databázach programu HSC pomocou nasledujúcich rovníc:

$$c_p = \left(\frac{dH}{dT} \right)_{P,n} \quad (\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$$

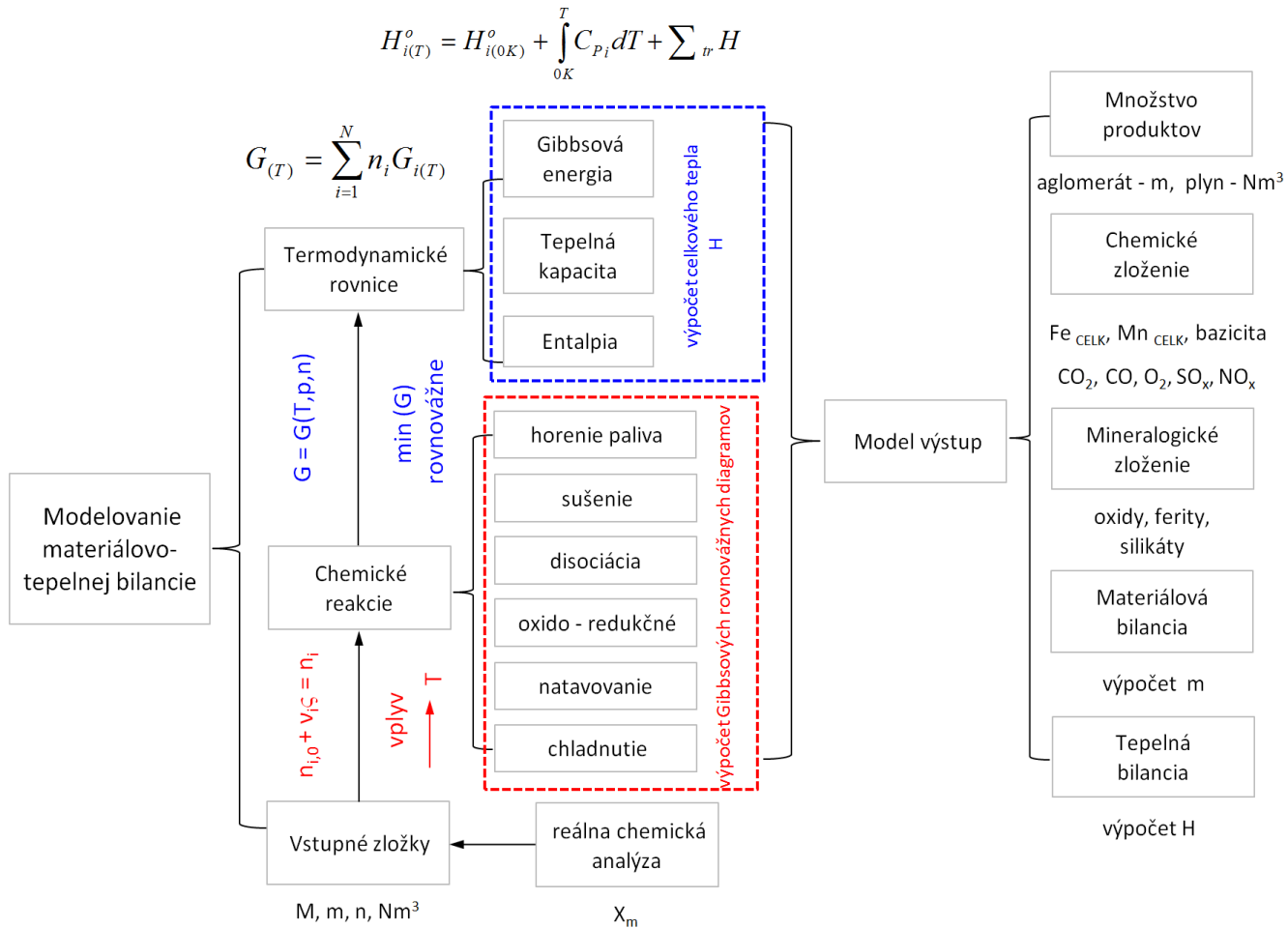
$$\Delta H(T) = \Delta H_p(298.15 \text{ K}) + \int_{298.15 \text{ K}}^T C_P dT + \Delta H_{tr} \quad (\text{J})$$

$$H_{(T)}^o = \left(\sum_{i=1}^N \nu_i \Delta H_{i(T)}^o \right)_{prod} - \left(\sum_{i=1}^N \nu_i \Delta H_{i(T)}^o \right)_{reakt} \quad (\text{J})$$

$$\Delta_R G_{(T)}^o = \left(\sum_{i=1}^N \nu_i \Delta G_{i(T)}^o \right)_{prod} - \left(\sum_{i=1}^N \nu_i \Delta G_{i(T)}^o \right)_{reakt} \quad (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$$



Termodynamický model



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Porovnanie fázového zloženia popola po horení palív

Palivo	Modelovanie (HSC program)		Experimentálna analýza	
koks	kremeň	SiO ₂	kremeň	SiO ₂
	mullit	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	mullit	Al ₆ Si ₂ O ₁₃
	hematit	Fe ₂ O ₃	hematit	Fe ₂ O ₃
	hercynit	FeAl ₂ O ₄	anhydrit	CaSO ₄
	oligoklas	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	augit	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆
lignin	kremeň	SiO ₂	kremeň	SiO ₂
	oligoklas	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	oligoklas	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
	kalцит	CaCO ₃	kalцит	CaCO ₃
	wollastonit	CaSiO ₃	hornblendit	(Ca,Na) ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ (Si,Al) ₈ O ₂₂ (OH,F) ₂
			anhydrit	CaSO ₄



Mineralogické zloženie bolo stanovené pomocou XRD spektrometra SEIFERT XRD 3003 / PTS.



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513



Porovnanie parametrov horenia palív

Parameter	Palivo	Modelovanie HSC program	Experimentálna analýza
Výhrevnosť (MJ/kg)	koks 1	28.02	28.16
	koks 2	28.57	28.87
	lignin	22.87	23.14
	dubové piliny	16.43	16.56
	borovicové piliny	19.07	18.93
	orechové škrupiny	16.31	16.90
	drevné uhlie 1	31.86	32.66
	drevné uhlie 2	29.85	29.07
Obsah popola (hm%)	koks 1	12.43	12.10
	koks 2	14.12	13.15
	lignin	3.38	3.40
	dubové piliny	1.59	1.50
	borovicové piliny	1.08	0.91
	orechové škrupiny	0.68	0.72
	drevné uhlie 1	2.33	2.30
	drevné uhlie 2	4.97	5.08

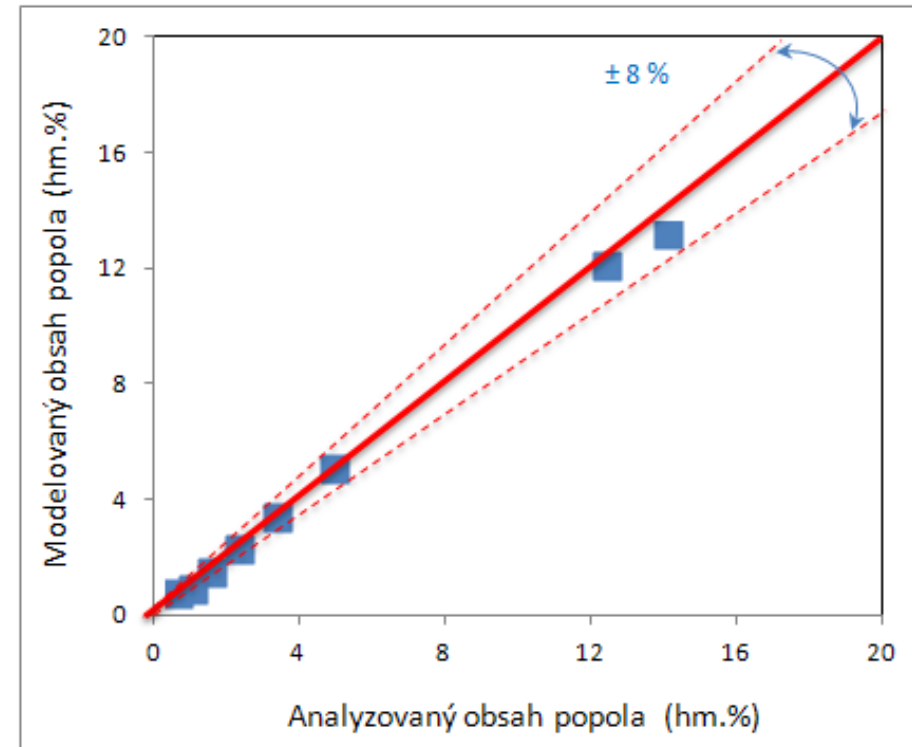
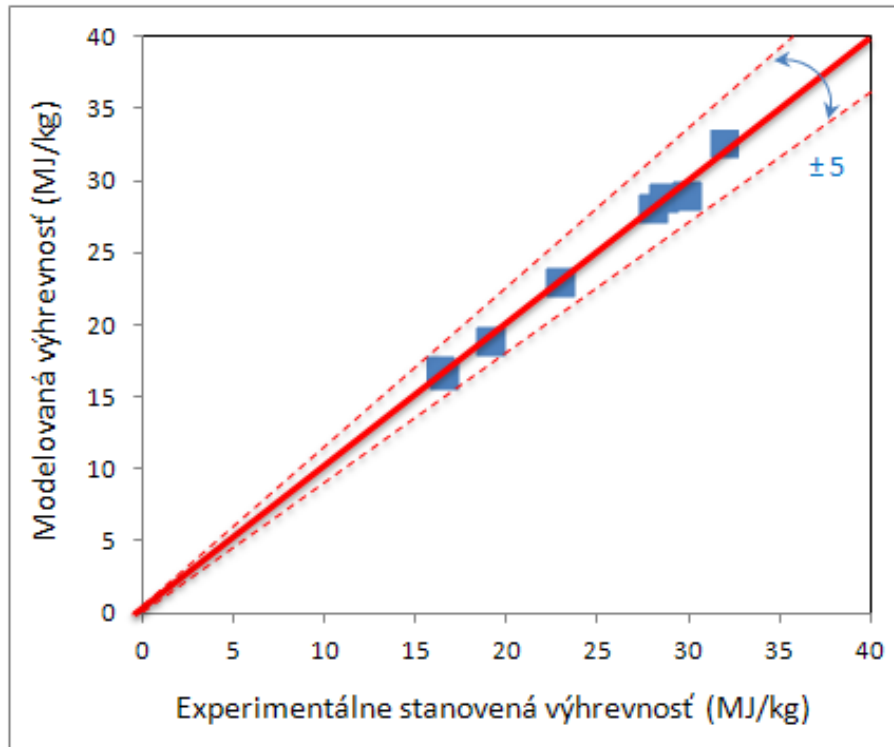


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Porovnanie parametrov horenia palív



Modelové výpočty v rámci materiálno-tepelnej bilancie horenia uhlíkatých palív vrátane biomasy majú **vysokú koreláciu** s experimentálne stanovenými vlastnosťami.



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513



Vybrané parametre materiálovo – tepelnej bilancie výroby aglomerátov

Palivo	Množstvo aglomerátu (kg)		Množstvo pridaného paliva (kg)		Tepelný efekt spekania* (MJ/spekanie)
	LSP	HSC	LSP	HSC	
	(reálne)	(vypočítané)	(reálne)	(vypočítané)	
koks	78.55	80.18	4.35	4.97	-1.15
koks+20 % lignin	-	77.92	-	5.00	32.45
koks+20 % lignin	76.21	77.89	5.52	5.70	-1.84
koks+20 % piliny 1	-	77.92	-	5.00	48.21
koks+20 % piliny 1	73.52	74.20	6.21	6.45	-1.84
koks+44 % piliny 1	71.44	72.81	7.04	7.85	-0.95
koks+20 % piliny 2	71.86	72.55	8.60	8.05	-1.84
drevné uhlie	80.05	81.77	4.42	5.00	-8.19
drevné uhlie	80.15	81.35	4.29	4.72	-1.19

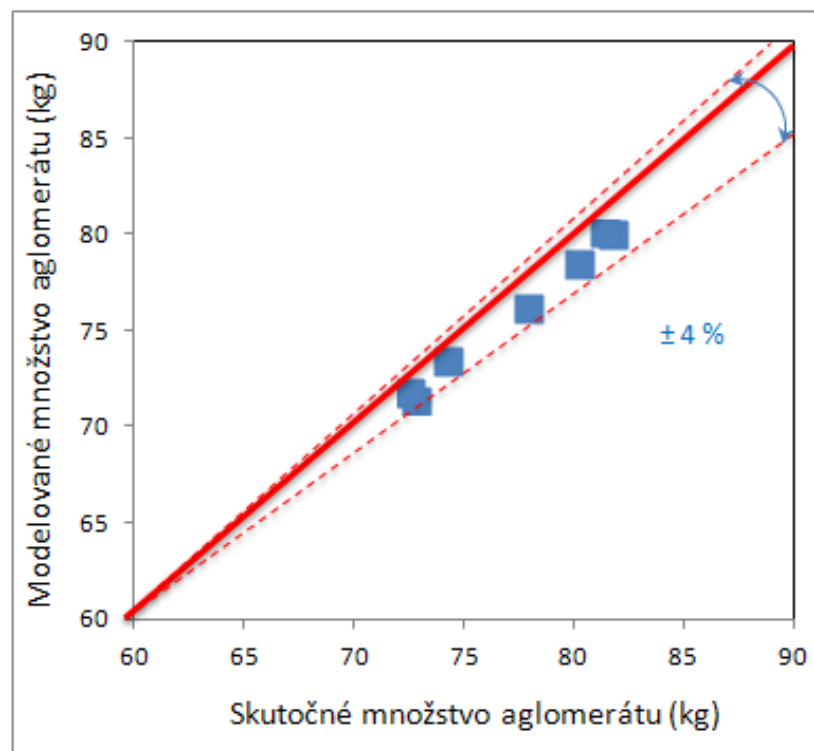
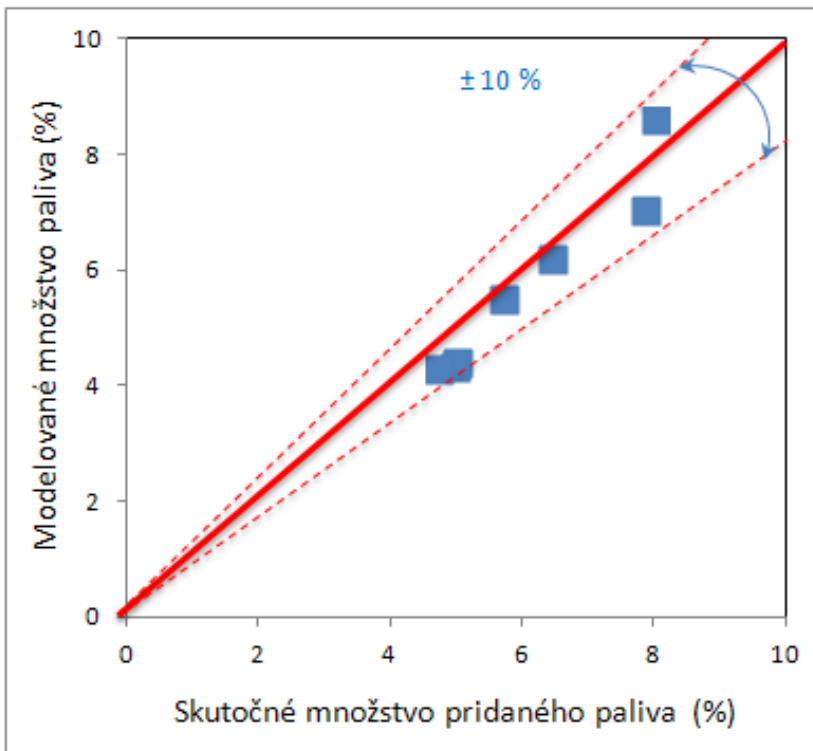


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Porovnanie parametrov materiálovo – tepelnej bilancie výroby aglomerátov



Modelové výpočty pridaného paliva pre výrobu aglomerátu úzko korelujú s experimentálne stanovenými hodnotami. **Vyššia korelácia** bola zistená pre **množstvo** vyprodukovaného **aglomerátu** (simulované a skutočné).



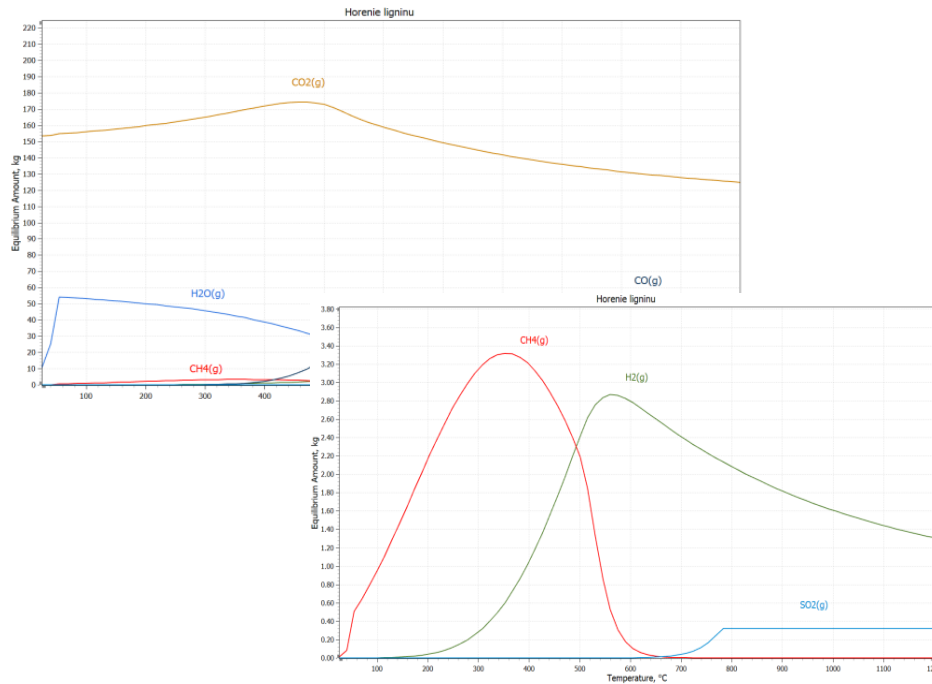
AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Softvérová aplikácia

Na základe matematicko–bilančného modelu materiálovo-tepelnej bilancie aglomeračného procesu za použitia biomasy (vytvorený v roku 2018) bola vytvorená softvérová aplikácia **SINTERING_BALANCE** v programe HSC Chemistry (Outokumpu Research Oy, Pori, Finland), pomocou ktorej je možné kontrolovať celkový tepelný efekt aglomeračného procesu v priebehu jednotlivých experimentálnych laboratórnych spekaní.



	INPUT SPECIES (1)	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm3	Latent H MJ	Total H MJ
1	Koks	25 000	0.073	1.000	0.046	0.00	-2.33
2	C	25 000	0.067	0.8005	0.000	0.00	0.00
3	H ₂ (g)	25 000	0.001	0.0028	0.032	0.00	0.00
4	S	25 000	0.000	0.0028	0.004	0.00	0.00
5	O ₂ (g)	25 000	0.000	0.0057	0.004	0.00	0.00
6	N ₂ (g)	25 000	0.000	0.0122	0.010	0.00	0.00
7	Fe ₂ O ₃	25 000	0.000	0.0343	0.000	0.00	-0.18
8	SiO ₂	25 000	0.001	0.0438	0.000	0.00	-0.66
9	Al ₂ O ₃	25 000	0.000	0.0266	0.000	0.00	-0.44
10	CaO	25 000	0.000	0.0086	0.000	0.00	-0.10
11	MgO	25 000	0.000	0.0035	0.000	0.00	-0.05
12	K ₂ O	25 000	0.000	0.002	0.000	0.00	-0.01
13	Na ₂ O	25 000	0.000	0.0014	0.000	0.00	-0.01

	OUTPUT SPECIES (1)	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm3	Latent H MJ	Total H MJ
1	Procesný plyn	25 000	0.309	9.662	7.043	0.00	-26.95
2	CO ₂ (g)	25 000	0.065	2.874	1.489	0.00	-25.70
3	CO(g)	25 000	0.001	0.037	0.030	0.00	-0.15
4	H ₂ O(g)	25 000	0.004	0.080	0.100	0.00	-1.07
5	SO ₂ (g)	25 000	0.000	0.006	0.002	0.00	-0.03
6	N ₂ (g)	25 000	0.238	6.655	5.415	0.00	0.00
7	O ₂ (g)	25 000	0.000	0.010	0.007	0.00	0.00
8	Popel	25 000	0.001	0.118	0.000	0.00	-1.45
9	Fe ₂ O ₃	25 000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
10	Fe ₃ O ₄	25 000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
11	*2FeO*SiO ₂	25 000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
12	FeAlO ₄	25 000	0.000	0.075	0.000	0.00	-0.86
13	CaO*Al ₂ O ₃ *2SiO ₂	25 000	0.000	0.043	0.000	0.00	-0.65
14	*3Al ₂ O ₃ *2SiO ₂	25 000	0.000	-0.046	0.000	0.00	0.73
15	SiO ₂	25 000	0.001	0.030	0.000	0.00	-0.46
16	MgSiO ₃	25 000	0.000	0.009	0.000	0.00	-0.13
17	CaSiO ₃	25 000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
18	Na ₂ SiO ₃						
19	K ₂ O*SiO ₂						
20	P ₂ O ₅						

	BALANCE	Temper. °C	Amount kmol	Amount kg	Amount Nm3	Latent H MJ	Total H MJ
1	IN1		0.377	9.783	6.976	0.00	-2.33
2	OUT1		0.310	9.780	7.043	0.00	-28.39
3	BALANCE		-0.067	-0.003	0.067	0.00	-26.07
4							



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaž výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513



Špecifikácia termodynamického modelu

Na základe modelovania procesu horenia a spekania je možné vytvorený termodynamický model charakterizovať pomocou nasledujúcich parametrov:

- a) výpočet výhrevnosti palív,
- b) predikcia fázového zloženia popola po horení palív,
- c) výpočet množstva aglomerátu,
- d) predikcia mineralogického zloženia aglomerátu pri spekacích teplotách,
- e) výpočet materiálovo-tepelnej bilancie na základe vstupných a výstupných entalpií jednotlivých zložiek,
- f) výpočet obsahu Fe_{CELK} v zmesi a v aglomeráte podľa stechiometrického prepočtu mineralogického zloženia.



Optimalizácia podmienok zbaľovania



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

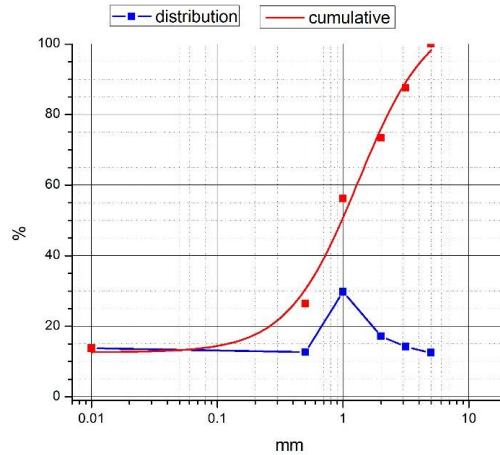
**Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513**

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

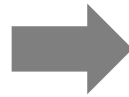
Optimalizácia metodík na dezintegráciu a kompaktáciu biomasy



Dezintegrátor



Lis



Pred samotným zbaľovaním boli optimalizované metodiky zamerané na úpravu fyzikálnych vlastností biomasy - dôležité z hľadiska prípravy biomasy ako dôležitého komponentu aglomeračnej vsádzky - hlavne čo sa týka dosiahnutia požadovanej zrnitosti a homogenity.



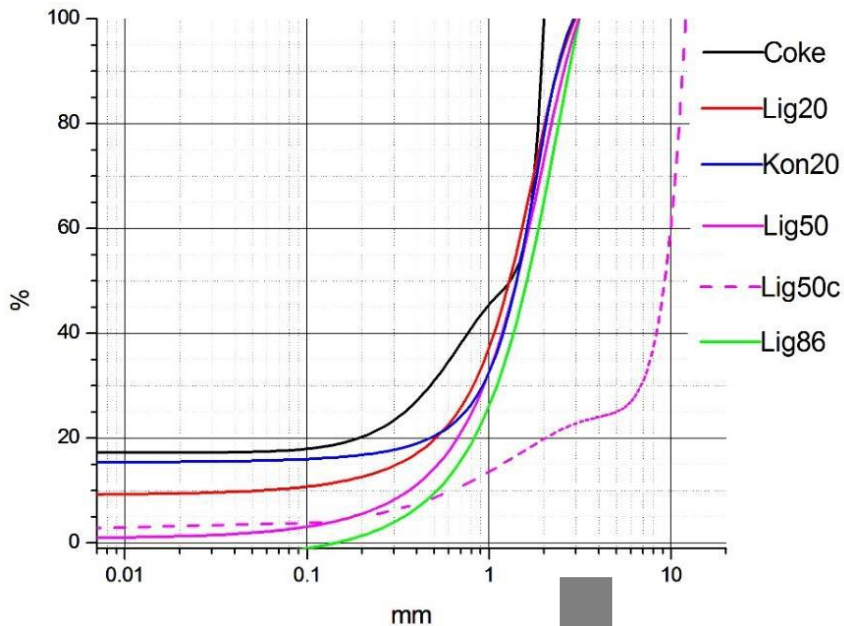
AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Príprava a optimalizácia modelových vsádzok

Na základe experimentov horenia koksu a biomasy s rôznou zrnitosťou (r. 2018) boli v aktuálnej etape riešenia optimalizované zrnitosti pri náhrade koksu biomasou (lignin a konope):



granulometria zmesných palív bola mierne posunutá v zmysle poklesu **najjemnejších frakcií** so stúpajúcou náhradou ligninových peliet

kumulatívne krivky zmesných palív pre jednotlivé spekania



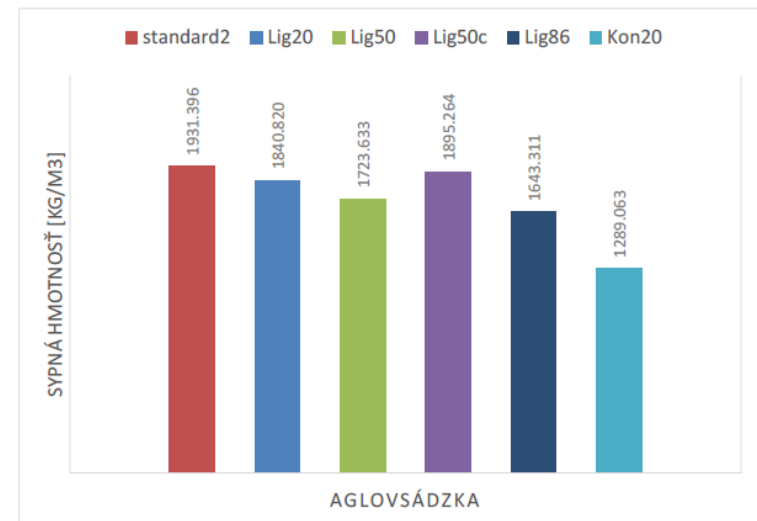
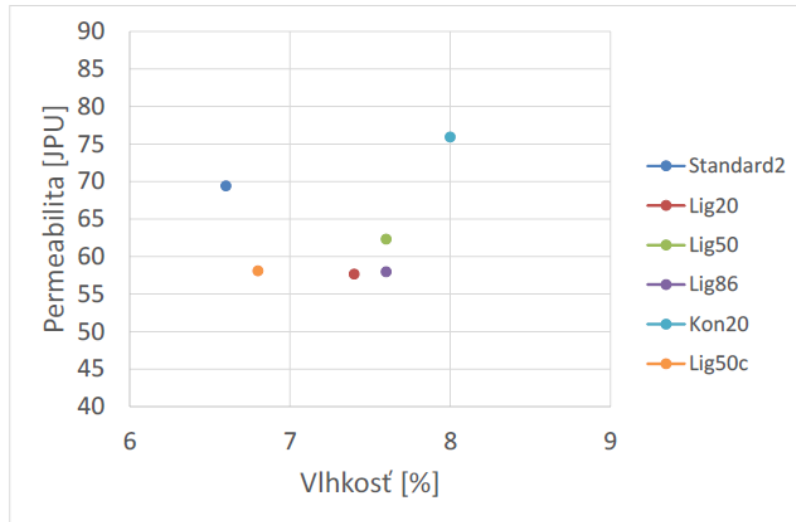
AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Príprava a optimalizácia modelových vsádzok

Cieľom bolo predpeletizovať vsádzku na dostatočnú priedušnosť pre zabezpečenie efektívneho presávania počas spekania.



vypočítané hodnoty **permeability** a stanovené **sypné merné hmotnosti** pri testovaní ligninových peliet a konopného pazderia oproti tzv. štandardnej vsádzke s koksovým prachom

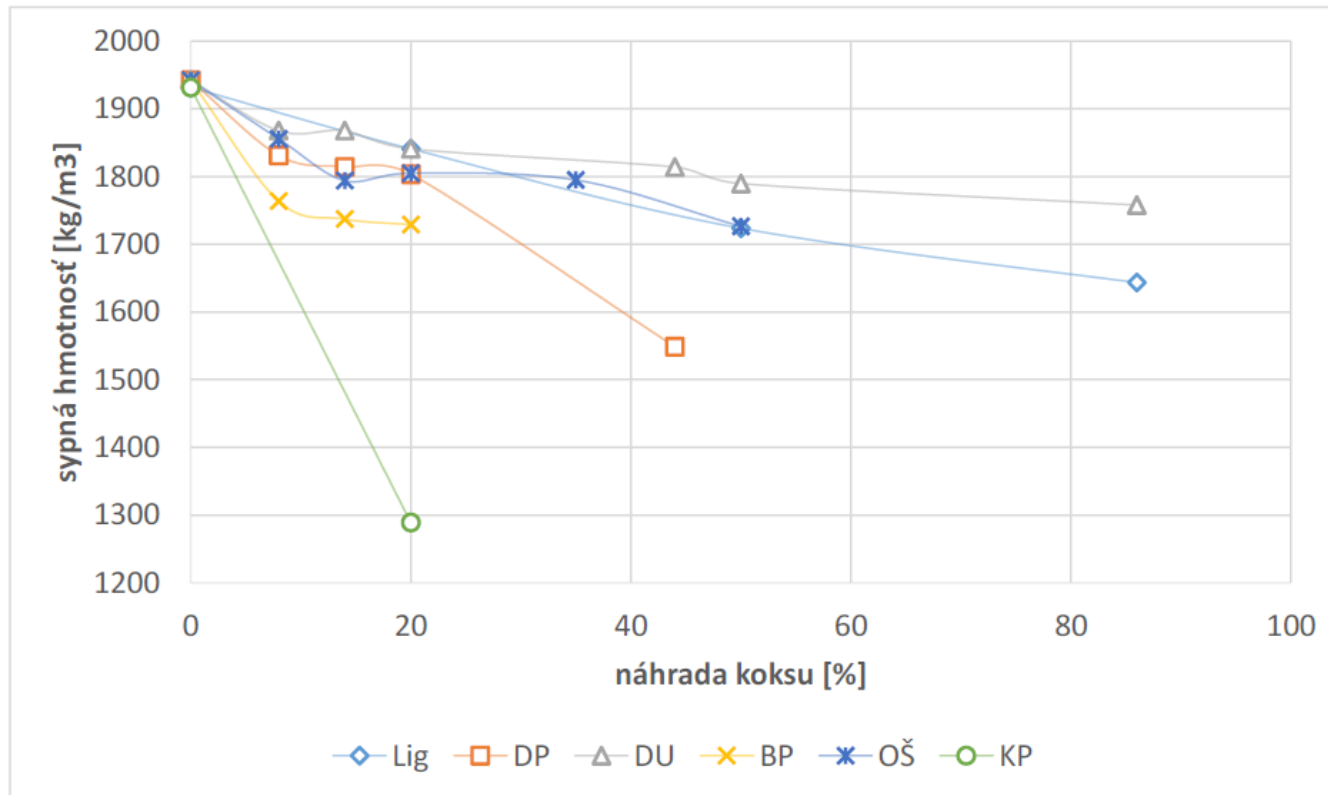


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Sypná merná hmotnosť aglovsádzok s rôznou biomasou



- Lig – lignín
- DP – dubové piliny
- DU – drevné uhlie
- BP – borovicové piliny
- OŠ – orechové škrupiny
- KP – konopné pazderie

Sypná merná hmotnosť vsádzky je funkciou sypných merných hmotností jednotlivých zložiek zmesi, ako aj **mikropeletizačného procesu** počas zbaľovacieho procesu, kedy je dosahovaná finálna permeabilita a vlhkosť vsádzky.



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513



Optimalizácia podmienok spekania s definovaným typom biomasy - lignin

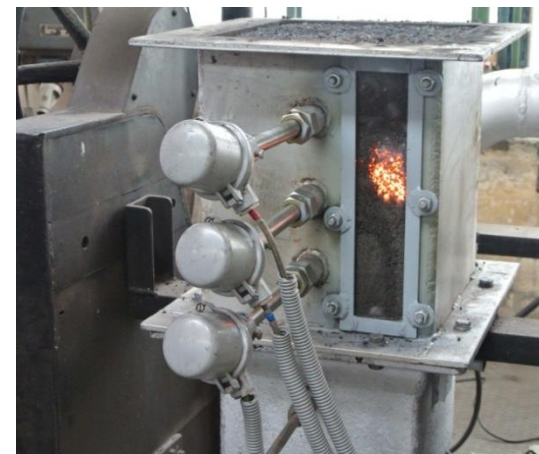
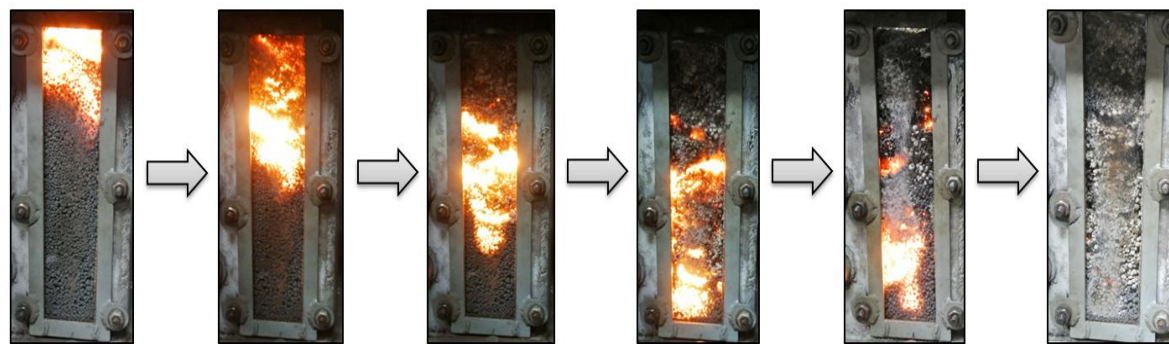
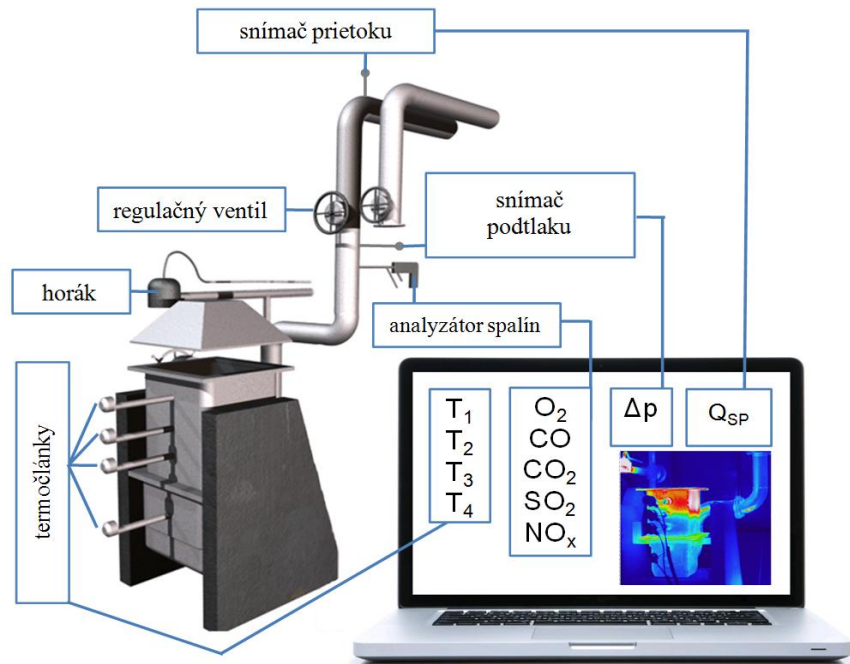


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Laboratórna spekacia panvička na experimentálne štúdium biomasy v aglomeračnom procese



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaž výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

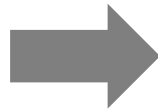
Sledované parametre vysokoteplotných spekaní

V rámci vysokoteplotných spekaní za použitia ligninu boli sledované, analyzované a vypočítané nasledujúce parametre:



- postup zóny horenia,
- teplotné profily v spekanej vrstve,
- teploty spalín,
- chemické zloženie spalín,
- fyzikálne, mechanické a chemicko – mineralogické vlastnosti aglomerátov.

Nové parametre:



- oblasti tvorby tekutej fázy - LPFA
- časy zotrvania na teplotách tavenia - DTMM



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Vypočítané parametre pri analýze teplotného profilu spekaní

Z teplotných kriviek je možné analyzovať oblasť teplôt, pri ktorých vznikajú taveninové fázy. Pre tento účel boli kalkulované parametre tzv. liquid phase formation area (LPFA) - teda oblasti (plochy) tvorby tekutej fázy a časy zotrvania na teplotách tavenia (DTMM-duration of temperature for mineral melting).

$$LPFA = \int_{t_i}^{t_e} (T_t - T_0) dt \quad [^{\circ}\text{C}\cdot\text{sec}]$$

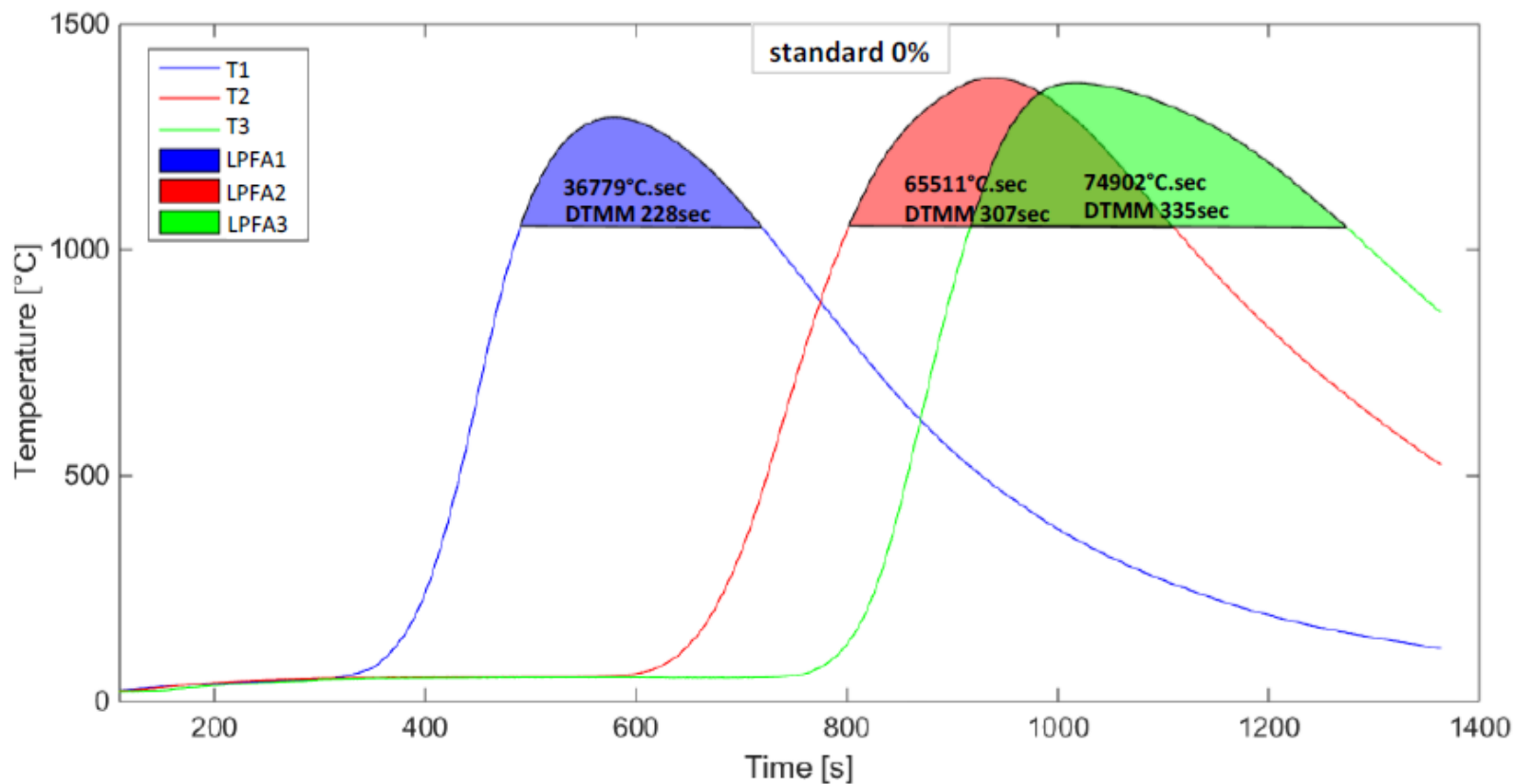
$$DTMM = t_e - t_i \quad [\text{sec}]$$

t_e – čas konca na teplote tavenia

t_i – čas počiatku teploty tavenia



Teplotný profil s určenými LPFA a DTMM pre spekania bez náhrady koksu

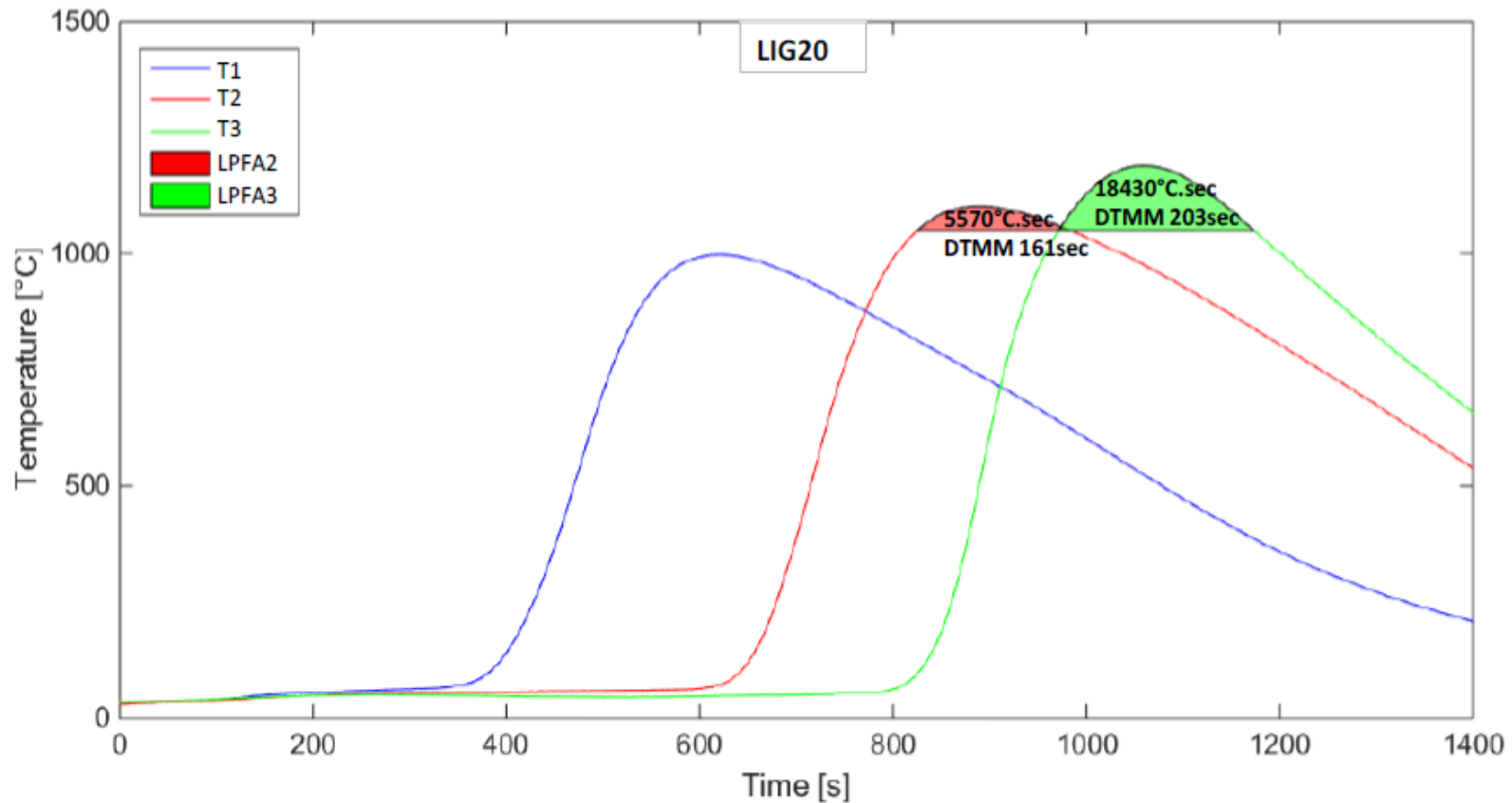


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaž výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513



Teplotný profil s určenými LPFA a DTMM pre spekania s 20 % náhradou koksu ligninom

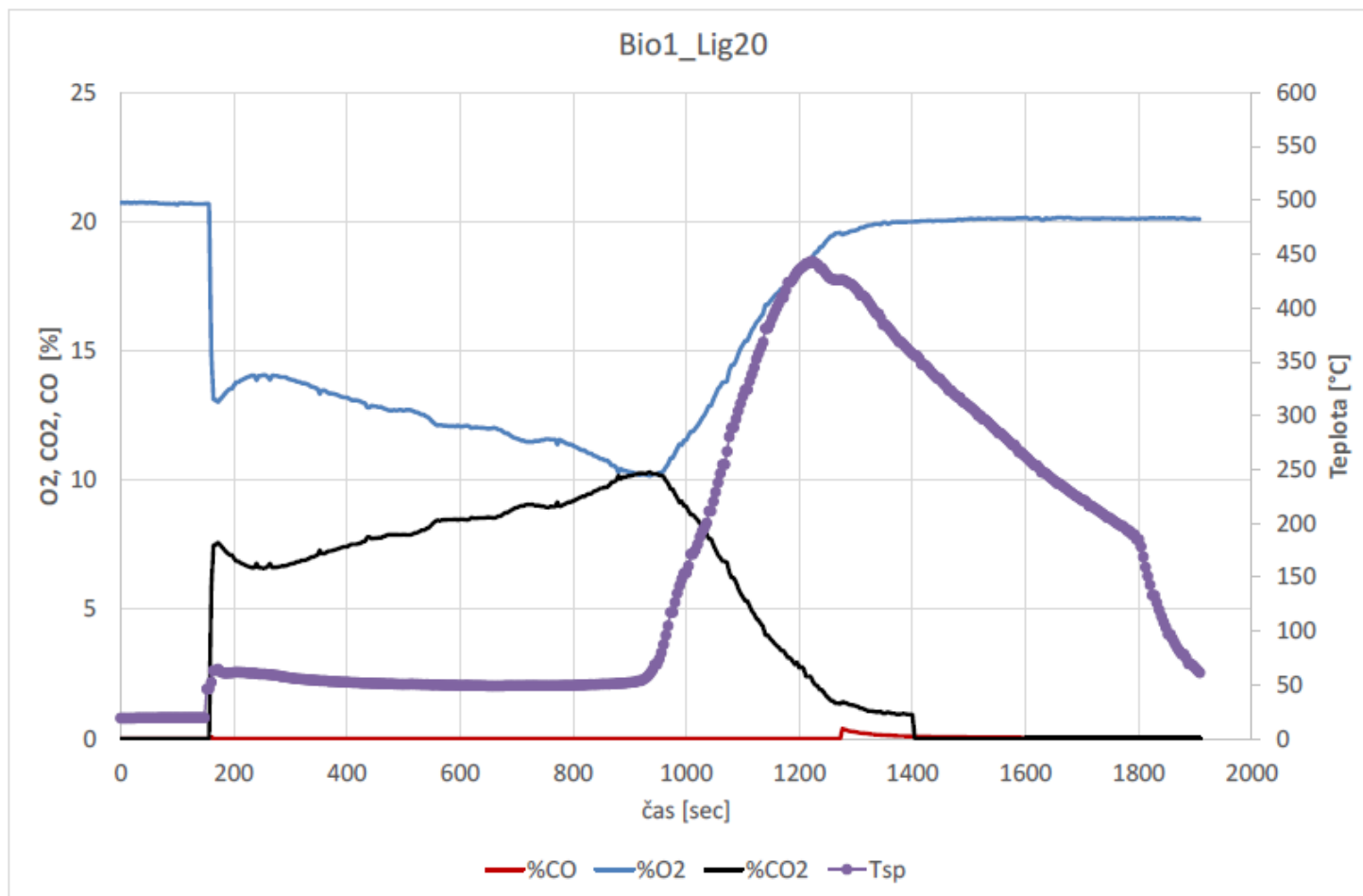


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaž výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Priebeh zloženia spalín a teplota spalín pri spekaní s 20 % náhradou koksu ligninom

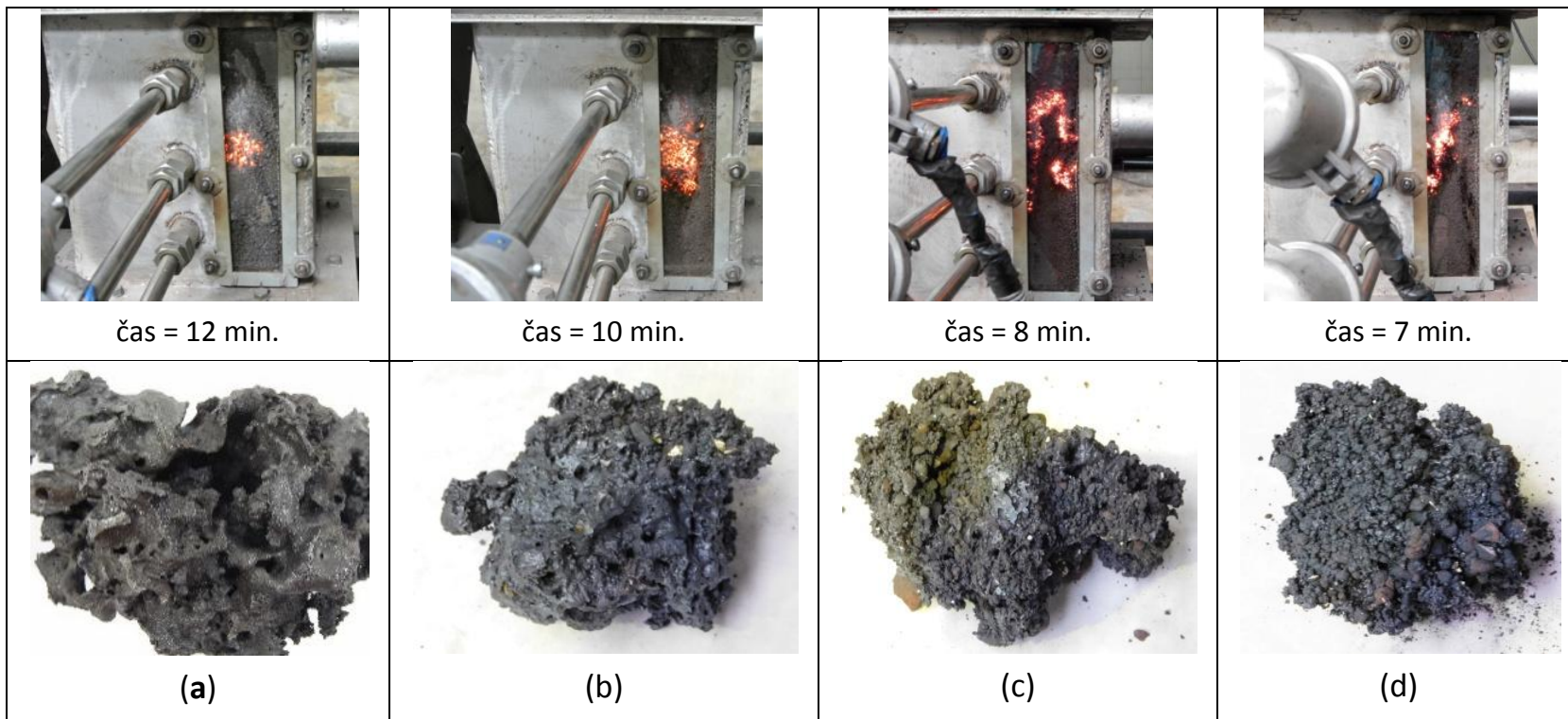


AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

Charakteristika zóny spekania a aglomerátov vyrobených pomocou koksu a ligninu



(a) koks, (b) koks + 20% lignin, (c) koks + 50% lignin, (d) koks + 86% lignin



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

Zníženie energetickej a environmentálnej záťaže výroby
železorudného aglomerátu náhradou fosilného paliva
odpadnou biomasou APVV-16-0513

UMET
ÚSTAV
METALURGIE

- boli realizované merania spektier biomasy pomocou infračervenej spektroskopie s Furierovou transformáciou (FTIR) a Ramanovskej spektroskopie,
- boli vytvorené nové termodynamické modely horenia biomasy a softvérová aplikácia materiálovo – tepelnej bilancie výroby aglomerátu za použitia biomasy,
- bola optimalizovaná zrnitostná skladba aglomeračných vsádzok za použitia ligninu,
- boli realizované laboratórne spekania za použitia nových druhov biomasy – ligninu a konope,
- boli realizované testy redukovateľnosti vybraných vzoriek aglomerátov (podľa ISO 4695).



- bola dosiahnutá korelácia pri porovnaní niektorých hodnôt spaľovania a spekania počas matematického modelovania a experimentálnej simulácie,
- vytvorením nového výpočtového modelu materiálovo-tepelnej bilancie výroby aglomerátu je možnosť predikovať minerálne fázy produktu počas reálneho procesu spekania,
- parametre zbaľovania (napr. sypné merné hmotnosti, granulometria) sa menili v závislosti od množstva a druhu koeficientu náhrady,
- spekania s modelovými vsádzkami s rôznou substitučnou náhradou vykazovali rozdielne ukazovatele,
- použitie ligninu až do 50 % náhrady koksu sa neprejavilo výraznou negatívnou zmenou výsledných fyzikálno – chemických vlastností aglomerátu, túto výšku substitúcie je možné považovať za prijateľnú.

