



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-19-0170

Výroba plynu s parametrami kvality plynného paliva, splyňovaním tuhého odpadu a biomasy

Zodpovedný riešiteľ **prof. Ing. Juma Haydary, PhD.**

Príjemca

Slovenská technická univerzita v Bratislave - Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

neboli

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Výsledkom projektu z hľadiska praktickej aplikácie je prototyp laboratórnych rozmerov procesu pyrolýza/ separátne splyňovanie produktov tzv. PSPG proces vrátane procesov čistenia plynu od kontaminantov. Ďalším výsledkom projektu s praktickým významom je kompletný počítačový model procesu dvojestupňového splyňovania biomasy a odpadu, ktorý sa môže použiť pri návrhu a optimalizácii uvedeného procesu v priemyselných rozmeroch. Napriek tomu, že uvedené výsledky sú originálne, neboli podané patentové prihlášky ani iná forma registrácie výsledkov nebola vykonaná.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Výsledky projektu sme publikovali v 16. článkoch v karentovaných časopisoch registrovaných vo WoS a Scopus, v 6. článkoch indexovaných vo WoS a/alebo Scopus, v 2. článkoch v neindexovaných časopisoch a v 56. konferenčných príspevkoch. Sedem ďalších rukopisov sú v recenznom konaní a štyri rukopisy pripravené na odoslanie na publikáciu. Publikácie, ktoré vznikli s podporou projektu zatiaľ získali 117 citácií. Dole uvádzam iba zoznam článkov publikovaných v karentovaných časopisoch so scinetometrickými údajmi a stručným popisom článku.

1. HAYDARY, Juma - RAPČANOVÁ, Erika - ŠKULEC, Miroslav. Purification of syngas from Refuse-Derived Fuel (RDF) gasification: Techno-economic analysis. In Thermal Science and Engineering Progress. Vol. 44 (2023), s. [1-10], art. no. 102024. ISSN 2451-9049 (2022: 4.800 - IF, Q1 - JCR Best Q, 0.942 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1016/j.tsep.2023.102024 ; SCOPUS: 2-s2.0-85165965268 ; CC: 001050188500001. Táto práca sa zaoberá technicko-ekonomickou analýzou čistenia plynu získaného splyňovaním tuhého alternatívneho paliva (TAP) od kontaminantov dvoma rôznymi

metódami, suchou metódou pomocou tuhých reagentov a mokrou absorpčnou metódou.

2. HAYDARY, Juma - ROYEN, Mohammad Jafar - NOORI, Abdul Wasim. Process conditions sensitive (PCS) thin-layer mathematical model of hot air convective drying. In Chemical engineering communications. 1, July (2023), s. [1-13]. ISSN 0098-6445 (2022: 2.500 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.431 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1080/00986445.2023.2223136.

V tejto práci sme publikovali nový model výpočtu kinetiky sušenia v tenkej vrstve. Model je originálny tým, že je senzitívny na zmenu parametrov procesu ako teplota, rýchlosť prúdenia vzduchu, vlhkosť vzduchu a veľkosť častíc.

3. JAZIE, Ali A. - HAYDARY, Juma - ABED, A. Suhad - HUSÁR, Jakub. Gas-Phase Deoxygenation of Biomass Pyrolysis Tar Catalyzed by Rare Earth Metal Loaded H beta Zeolite. In Catalysts. Vol. 13, iss. 6 (2023), s. [1-23], art. no. 1016. ISSN 2073-4344 (2022: 3.900 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.690 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/catal13061016 ; SCOPUS: 2-s2.0-85163873496 ; CC: 001020682700001.

V tejto práci, ktorá vznikla v rámci pobytu Dr. Jazieho z Iraku v našom laboratóriu, sa skúma hydrodeoxygenácia (čistenie produktov termického rozkladu od prebytočného viazaného kyslíka) v plynnej fáze pomocou kovov alkalických zemín na špecifickom type beta zeolitu. Metóda sa preukázala ako účinná pri hydrodeoxygenácii dechtov získaných pyrolýzou biomasy.

4. KUMAR SHARMA, Rajat - NAZARI, Mohammad Ali - HAYDARY, Juma - SINGH, Triveni Prasad - MANDAL, Sandip. A Review on Advanced Processes of Biohydrogen Generation from Lignocellulosic Biomass with Special Emphasis on Thermochemical Conversion. In Energies. Vol. 16, iss. 17 (2023), s. [1-27], art. no. 6349. ISSN 1996-1073 (2022: 3.200 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.632 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/en16176349 ; SCOPUS: 2-s2.0-85170569248 ; CC: 001062365600001.

Táto práca vznikla v rámci pobytu doktoranda Rajat Kumar Sharma z Indie u nás. Prehľadná práca sa zaoberá výrobou bio-vodíka z biomasy najmä metódou termokatalytického rozkladu. Jednou z hlavných možností použitia vyrobeného a vyčisteného syntézneho plynu je výroba vodíka.

5. JAZIE, Ali A. - HAYDARY, Juma - ABED, A. Suhad - AL-DAWODY, F. Mohamed. Hydrothermal liquefaction of Fucus vesiculosus algae catalyzed by H β zeolite catalyst for Biocrude oil production. In Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts. Vol. 61, (2022), s. [1-13], art. no. 102596. ISSN 2211-9264 (2021: 5.276 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.878 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1016/j.algal.2021.102596 ; SCOPUS: 2-s2.0-85121806488 ; CC: 000807246000011.

Táto práca preskúma termokatalytický rozklad rias na beta-zeolite. Preštudovali sme vplyv katalyzátora a podmienok procesu na stupeň premeny rias na bioolej. Táto práca takisto vznikla v dôsledku spolupráce s Dr. Jaziem z Iraku, ktorý absolvoval šesťmesačný výskumný pobyt na Slovensku a spolupracoval v rámci riešenia projektu.

6. NOORI, Abdul Wasim - ROYEN, Mohammad Jafar - MEDVEĽOVÁ, Alžbeta [Medveľová] HAYDARY, Juma. Drying of Food Waste for Potential Use as Animal Feed. In Sustainability [elektronický zdroj]. Vol. 14, iss. 10 (2022), s. [1-19], art. no. 5849. ISSN 2071-1050 (2021: 3.889 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.664 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/su14105849 ; SCOPUS: 2-s2.0-85130536661 ; CC: 000803263800001.

Sušenie potravinárskeho zmesového odpadu bolo predmetom skúmania tejto práce. Sušenie je jedným z kľúčových krokov pri splyňovaní biomasy a odpadu. Optimalizácia procesu sušenia môže významným spôsobom ovplyvniť realizovateľnosť uvedených procesov. V práci takisto sa vyšetroval potenciál využitia vysušeného potravinárskeho odpadu ako komponent krmiva pre zvieratá.

7. ŠUHAJ, Patrik - HAYDARY, Juma - HUSÁR, Jakub - ANNUS, Július. Experimental verification of a pilot pyrolysis/split product gasification (PSPG) unit. In Energy. Vol. 244, (2022), s. [1-9], art. no. 122584. ISSN 0360-5442 (2021: 8.857 - IF, Q1 - JCR Best Q, 2.041 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1016/j.energy.2021.122584 ; SCOPUS: 2-s2.0-85119301506 ; CC: 000792259700002.

V tejto práci sme publikovali najvýznamnejší výsledok projektu a to Experimentálne overovanie pilotnej jednotky na dvojstupňové splyňovanie odpadu a biomasy metódou PSPG. V práci sme publikovali výsledky experimentálnej činnosti, ktorými sa preukázali výhody uvedeného procesu oproti konvenčnému jednostupňovému procesu.

8. FURDA, Patrik - VARINY, Miroslav - LABOVSKÁ, Zuzana. Towards time-effective

optimization: Enviro-economic study of the C3MR LNG process. In Energy Conversion and Management. Vol. 260, (2022), s. [1-16], art. no. 115602. ISSN 0196-8904 (11.533 - 2021). V databáze: DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115602 ; SCOPUS: 2-s2.0-85129554797 ; CC: 000830154900003.

Táto práca sa venuje metodike optimalizácie a techno-ekonomickej analýzy procesov. Pri optimalizácii komplexných procesov sa musí vykonať obrovské množstvo opakujúcich sa výpočtov, tieto výpočty sú často tak zdĺhavé, že sa nedajú realizovať v reálnom čase.

Zníženie časovej náročnosti optimalizačných metód bolo predmetom štúdie tejto práce.

9. VARINY, Miroslav - KŠIŇANOVÁ, Marianna. Repowering Industrial Combined Heat and Power Units: a Contribution to Cleaner Energy Production. In Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 31, iss. 3 (2022), s. 2861-2879. ISSN 1230-1485 (1.871 - 2021). V databáze: DOI: 10.15244/pjoes/144096 ; SCOPUS: 2-s2.0-85129318401 ; CC: 000848095400046.

Táto práca skúma možnosti zníženia emisie pri priemyselných kogeneračných jednotkách zmenou zdroju energie. Práca sa venuje technologickej, environmentálnej a techno-ekonomickej analýze prípadov, keď sa zmení zdroj energie v existujúcej kogeneračnej jednotke napr. z klasických tuhých fosílnych palív na zemný plyn alebo procesný plyn, získaný splyňovaním biomasy.

10. Haydary, Juma, Patrik Šuhaj, and Michal Šoral. "Semi-Batch Gasification of Refuse-Derived Fuel (RDF)." Processes 9, no. 2 (2021): 343.

Táto práca skúma splyňovanie tuhého alternatívneho paliva získaného z komunálneho odpadu v dvojstupňovom poloprietokovom systéme. Najmä v práci sa analyzuje obsah dechtu a ich charakterizácia rôznymi metódami.

11. Variny, Miroslav, Dominika Jediná, Miroslav Rimár, Ján Kizek, and Marianna Kšiňanová. "Cutting Oxygen Production-Related Greenhouse Gas Emissions by Improved Compression Heat Management in a Cryogenic Air Separation Unit." International Journal of Environmental Research and Public Health 18, no. 19 (2021): 10370

Separácia vzduchu na kyslík a dusík je dôležitým procesom z pohľadu využitia dusíka ako inertné médium a kyslíka ako oxidačné médium pri splyňovaní odpadu. Ak ako splyňovacie médium sa použije vzduch, energetická hodnota vyrobeného plynu je nízka. Použitím kyslíka sa obsah energie plynu zvýši, ale výroba kyslíka vyžaduje ďalšie investičné a prevádzkové náklady. Táto práca sa venuje práve optimalizácii výroby kyslíka.

12. Husár, Jakub, Patrik Šuhaj, and Juma Haydary. "Experimental validation of complex mathematical model of screw reactor coupled with particle model describing pyrolysis of lignocellulosic biomass." Journal of Environmental Chemical Engineering 9, no. 4 (2021): 105543.

Kľúčovým procesom dvojstupňového splyňovania biomasy a odpadu je jej termický rozklad v prvom stupni. V tejto práci sme publikovali komplexný matematický model uvedeného procesu v reaktore závitkového typu. Model sa skladá z modelu kinetiky procesu, prestupu tepla a látky.

13. DZURNÁK, Róbert - VARGA, Augustín - JABLONSKÝ, Gustáv - VARINY, Miroslav - PÁSTOR, Marcel - LUKÁČ, Ladislav. Analyzing the Formation of Gaseous Emissions during Aluminum Melting Process with Utilization of Oxygen-Enhanced Combustion In Metals. Vol. 11, iss. 2 (2021), s. (1-21), art. no. 242. ISSN 2075-4701 (2020: 2.351 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.570 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/met11020242 ; SCOPUS: 2-s2.0-85100287272 ; CC: 000622774000001

Táto práca skúma možnosti zníženia tvorby emisií pri výrobe hliníku pomocou oxy-spaľovania v rotačnom reaktore. Získané poznatky boli neskôr použité pri návrhu procesu oxy-splyňovania odpadu a biomasy.

14. Variny, Miroslav, Augustín Varga, Miroslav Rimár, Ján Janošovský, Ján Kizek, Ladislav Lukáč, Gustáv Jablonský, and Otto Mierka. "Advances in Biomass Co-Combustion with Fossil Fuels in the European Context: A Review." Processes 9, no. 1 (2021): 100.

Táto prehľadová práca skúma možnosti spoluspaľovania biomasy a odpadu s fosílnymi palivami. Venuje sa najmä emisiám a emisiám skleníkových plynov a technologickým potenciálom spolupracovania biomasy a odpadu s fosílnymi palivami.

15. MANDAL, Sandip - KUMAR SHARMA, Rajat - BHATTACHARYA, T.K. - HETAL, Tanna - HAYDARY, Juma. Charring of pine needles using a portable drum reactor. In Chemical Papers. Vol. 76, iss. 2 (2022), s. 1239-1252. ISSN 2585-7290 (2021: 2.146 - IF, Q3 - JCR Best Q). V databáze: DOI: 10.1007/s11696-021-01893-4 ; SCOPUS: 2-s2.0-85117764472 ;

CC: 000754648600049.

Táto práca vznikla v spolupráci s kolegami z Indie, ktorí pôsobili u nás na výskumnom pobyte v rámci predchádzajúceho projektu. Práca sa venuje splyňovaniu borovicového ihličia, pričom sa charakterizovali produkty najmä bio-uhlie.

16. Furda, Patrik, Miroslav Variny, Zuzana Labovská, and Tomáš Cibulka. "Process drive sizing methodology and multi-level modeling linking MATLAB and Aspen Plus environment." *Processes* 8, no. 11 (2020): 1495.

Táto práca je venovaná možnostiam prepájania simulačného programu Aspen Plus s Matlabom pri riešení optimalizačných úloh.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky projektu majú veľký potenciál sa uplatniť v praxi. Od roku 2021 spolupracujeme s priemyselným partnerom so zámerom vyvinúť priemyselnú pilotnú jednotku dvojstupňového splyňovania odpadu a biomasy na základe laboratórneho prototypu a návrhu čistiacich jednotiek, ktoré boli vyvinuté v rámci tohto projektu a predchádzajúceho projektu. Projekt priemyselného partnera však narazil na určité administratívne prekážky, ktoré sa snaží riešiť. Existuje veľká pravdepodobnosť, že priemyselnému partnerovi sa podarí vyriešiť uvedené problémy a začať s realizáciou projektu.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Cieľom tohto projektu bol prispieť k hľadaniu odpovede na otázku, ako zo zmesových odpadov ekologickým spôsobom vyrobiť plyn s lepšími parametrami kvality, spĺňajúci požiadavky na plynné palivá. Projekt uvažoval s experimentálnym výskumom v laboratórnych podmienkach, matematickým modelovaním, počítačovou simuláciou procesov v priemyselnom meradle a technicko-ekonomickou analýzou rôznych variantov realizácie procesov. Projekt nadväzoval na riešenie predchádzajúceho projektu APVV-15-048, ktorým sa vyvinul samotný proces dvojstupňového splyňovania zmesového odpadu a biomasy.

Riešením projektu sme dospeli k záveru, že kombinácia termicko-katalytických vysokoteplotných (suchých) a nízokoteplotných absorpčných metód na čistenie plynu od rôznych kontaminantov, najmä tuhé častice, dechty a zlúčeniny chlóru a síry môže byť účinným spôsobom čistenia plynu. Pomocou experimentálnej činnosti v laboratórnom meradle, realizovanej na jednotke dvojstupňového termo-katalytického splyňovania tuhého odpadu a biomasy sme overili návrhové postupy čistenia plynu. Z teoretických výpočtov a experimentálnych výsledkov vyplýva, že pri optimálnej kombinácii a správnom nastavení čistiacich procesov je možné splyňovaním zmesových odpadov pochádzajúcего napríklad z komunálneho odpadu vyrobiť plyn s parametrami kvality plynného paliva. Pomocou experimentov v laboratórnom meradle sme zistili, aké množstvo jednotlivých produktov splyňovania s akým zložením vzniká pri rôznych podmienkach a ako sa zlúčeniny chlóru a síry, ktoré tvoria významné kontaminanty sa do jednotlivých produktov distribuuju. Na základe týchto poznatkov sme kalibrovali a doladili modely počítačovej simulácie jednotlivých procesov a zároveň aj počítačovú simuláciu celej výrobné jednotky. Realizovali sme techno-ekonomickú analýzu rôznych variantov realizácie procesu a sme ich vzájomne porovnali. Z výsledkov projektu vyplýva, že implementácia termokatalytického procesu ako splyňovanie či pyrolýza v prostredí existujúceho podniku, môže výrazným spôsobom znížiť investičné a prevádzkové náklady procesu. Takisto boli preštudované rôzne iné aspekty procesov termochemickej konverzie odpadu a biomasy.

Počas riešenia projektu sme výsledky projektu publikovali v 16. článkoch v karentovaných časopisoch registrovaných vo WoS a Scopus, v 6. článkoch indexovaných vo WoS a/alebo Scopus, v 2. článkoch v neindexovaných časopisoch a v 56. konferenčných príspevkoch. Sedem ďalších rukopisov sú v recenznom konaní a štyri rukopisy pripravené na odoslanie na publikáciu. Publikácie, ktoré vznikli s podporou projektu zatiaľ získali 117 citácií.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The aim of this project was to contribute to the solution of problems associated with the production of gas with better quality parameters, meeting the requirements for gaseous fuels, from mixed waste, in an ecological way. The project considered experimental

research in laboratory conditions, mathematical modeling, computer simulation of industrial scale processes and techno-economic analysis of various variants of process implementation. The project was a continuation APVV-15-048, which developed the two-stage gasification process of mixed waste and biomass.

The project solution resulted in a conclusion that the combination of thermal-catalytic high-temperature (dry) and low-temperature absorption methods for gas purification from various contaminants, especially solid particles, tar, and chlorine and sulfur compounds can be an effective way of gas purification. With the help of experimental measurements using a laboratory scale two-stage gasification unit, we verified the design procedures of gas purification. From theoretical calculations and experimental results, it follows that with an optimal combination and correct setting of the cleaning processes, it is possible to produce gas with gas fuel quality parameters by gasification of mixed waste originating from mixed waste like municipal waste. With the help of experiments on a laboratory scale, we found out what amount of individual gasification products with what composition are formed under different conditions and how chlorine and sulfur compounds, which form significant contaminants, are distributed to individual products. Based on this knowledge, we calibrated the computer simulation models of individual processes, as well as the computer simulation of the entire production unit. We carried out a techno-economic analysis of different variants of the process implementation and compared them with each other. The results of the project show that the implementation of a thermocatalytic process such as gasification or pyrolysis in the environment of an existing industry can significantly reduce the investment and operating costs of the process. Various other aspects of the processes of thermochemical conversion of waste and biomass were also studied.

During the implementation of the project, we published the results of the project in 16 articles in peer-reviewed SCI journals registered in WoS and Scopus, in 6 articles indexed in WoS and/or Scopus, in 2 articles in non-indexed journals and in 56 conference contributions. Seven manuscripts are under review and four other manuscripts are ready for publication. Publications created with the support of the project have received 117 citations so far.