

Kiatkamjon Intani

**Sustainable postharvest
processing of maize residues
(*Zea mays* L.) into biochar for
agricultural and environmental
applications**

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Agrartechnik in den Tropen und
Subtropen der Universität Hohenheim
herausgegeben von Prof. Dr. Joachim Müller

Band 21/2021

Kiatkamjon Intani

**Sustainable postharvest processing of maize
residues (*Zea mays* L.) into biochar for agricultural
and environmental applications**

D 100 (Diss. Universität Hohenheim)

Shaker Verlag
Düren 2021

Summary

This study was carried out to explore the potential of processing maize residues into biochar via self-purging pyrolysis. The ultimate goal was to identify the potential and challenges of processing maize residues into biochar using a self-purging pyrolysis reactor for agricultural and environmental applications. This dissertation starts with the development and assessment of a self-purging pyrolysis reactor, characterisation of the biochar and evaluation of the phytotoxicity of maize cob biochar. In the first chapter, a prototype self-purging pyrolysis reactor was constructed and tested for the conversion of maize biomass fractions (cobs, husks, leaves) into biochar. In the second chapter, the cob, husk, leaf and stalk biochars derived from the self-purging pyrolysis were characterised, and the influence of pyrolysis conditions on the biochar properties was investigated. In the third chapter, the phytotoxic effects of maize cob biochar treatments and application rates on the germination and seedling growth of cress (*Lepidium sativum*) were evaluated.

Biochars from maize cobs, husks and leaves were produced using a self-purging pyrolysis reactor. The physicochemical properties of the biomass and biochar were evaluated. Box- Behnken design was employed to identify the optimal pyrolysis conditions for high biochar yields. Multivariate correlations of biochar yields and pyrolysis parameters were established using reduced quadratic models with $R^2 = 0.9949$, 0.9801 and 0.9876 for cobs, husks and leaves, respectively. Biochar yields decreased with increasing temperature. The heating rate had less influence on biochar yields compared to the temperature and holding time. The highest biochar yield of 37.91% was obtained from maize leaves at a pyrolysis temperature of 300 °C, a heating rate of 15 °C/min and a holding time of 30 min. The highest yield of cob biochar was achieved at 300 °C, 5 °C/min and 30 min, which resulted in a yield of 33.42%. For the husk biochar, the highest yield of 30.69% was obtained at 300 °C, 5 °C/min and 33 min. The findings of this study confirmed that biochar can be produced from maize residues using a self-purging pyrolysis reactor, which can be considered as a low-cost pyrolysis unit for applications in developing countries.

Mathematical models were established and used to explain the experimental responses of volatile matter content (VM), ash content (AC), pH and electrical conductivity (EC) to the operating parameters, i.e. temperature, heating rate and holding time. The temperature showed the most significant effect on biochar properties. AC, pH and EC significantly increased ($p < 0.05$) with increasing temperature, while the VM decreased. The holding

time had less influence on the responses, while the heating rate showed insubstantial influence. Under the theoretical optimal conditions, the husk and leaf biochars had higher AC (11.42 and 26.55%), pH (10.96 and 11.51), and EC (12.37 and 6.79 mS/cm), but lower VM (7.38 and 8.39%) than biochars from cobs and stalks. It was concluded that the husk and leaf biochars were more desirable for composting with optimum pyrolysis conditions of 600 °C, 5 °C/min, 90 min and 600 °C, 15 °C/min, 79 min, respectively. The highest C content (72.58 to 86.92%) was observed in cob biochar, while N content was higher in leaf biochar (1.11 to 1.72%).

Maize cob biochar was produced via slow pyrolysis using a self-purging pyrolysis reactor. Biochar treatments included fresh biochar (FB), dried biochar (DB), washed biochar (WB), and biochar water extract (WE). Biochar application rates of 10, 20, and 30 t/ha were evaluated. Significant phytotoxic effects of cob biochar were observed on germination rates, shoot length, fresh weight, and dry matter content. Severe toxic effects were identified in FB and WE treatments, revealing high soil and environmental risks. The DB and WB showed less toxicity. The germination rate after 48 h (GR₄₈) decreased with increasing biochar application rates in all treatments. The observed order of performance of the biochar treatments for germination, shoot length, and shoot fresh weight for each application rate was WB>DB>WE>FB, while it was the reverse order for the shoot dry matter content. The mitigation of the phytotoxicity in fresh cob biochar by washing and heat treatment proved to be a simple and effective method. The selection of an economical biochar treatment depends on biochar properties, application rates, and specific requirements of the application. It should be noted that combining washing and heat treatments might further reduce biochar toxicity.

In conclusion, the production of biochar from maize residues via self-purging pyrolysis is a promising approach to utilize biomass waste and create value-added products for agricultural and environmental applications. The self-purging pyrolysis reactor should be further tested to produce biochar from other crop residues. Furthermore, other products (i.e. bio-oil and pyrolysis gas) from the self-purging pyrolysis should be collected and evaluated in future work. In order to increase food security by combating land degradation based on the use of maize residues in the pyrolysis process, the application of biochar as a soil amendment should be promoted and sustainable biochar production systems must be established.

Zusammenfassung

Diese Studie wurde durchgeführt, um das Verarbeitungspotenzial von Maisrückständen zu Biokohle durch selbstspülende Pyrolyse zu untersuchen. Ziel war es, die Potenziale und Herausforderungen der Verarbeitung von Maisrückständen zu Biokohle mittels eines selbstspülenden Pyrolysereaktors für landwirtschaftliche und umwelttechnische Anwendungen zu identifizieren. Diese Arbeit beginnt mit der Entwicklung und Bewertung eines selbstspülenden Pyrolysereaktors, der Charakterisierung der Biokohle und der Bewertung der Phytotoxizität der Maisspindelbiokohle. Im ersten Kapitel wurde ein Prototyp eines selbstspülenden Pyrolysereaktors konstruiert und getestet, der die Umwandlung von Maisbiomassefraktionen (Spindeln, Lieschblättern, Blätter) in Biokohle ermöglicht. Im zweiten Kapitel wurden die aus der selbstspülenden Pyrolyse abgeleiteten Spindel-, Lieschblatt-, Blatt- und Stängelbiokohls charakterisiert und der Einfluss der Pyrolysebedingungen auf die Biokohleeigenschaften untersucht. Im dritten Kapitel wurden die phytotoxischen Auswirkungen von Maisspindel-Biokohlebehandlungen und Ausbringungsraten auf die Keimung und das Keimlingswachstum der Kresse (*Lepidium sativum*) untersucht.

Biokohle aus Maisspindeln, Lieschblättern und Blättern wurde in einem selbstspülenden Pyrolysereaktor hergestellt. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Biomasse und Biokohle wurden bewertet. Box-Behnken-Design wurde angewandt, um die optimalen Pyrolysebedingungen für hohe Biokohleerträge zu identifizieren. Multivariate Korrelationen von Biokohleerträgen und Pyrolyseparametern wurden mit reduzierten quadratischen Modellen mit $R^2 = 0,9949$, $0,9801$ und $0,9876$ für Spindeln, Lieschblätter bzw. Blätter ermittelt. Die Biokohleerträge nahmen mit steigender Temperatur ab. Die Aufheizrate hatte einen geringeren Einfluss auf die Biokohleerträge als die Temperatur und die Haltezeit. Der höchste Biokohleertrag von 37,91% wurde aus Maisblättern bei einer Pyrolysetemperatur von 300 °C, einer Aufheizrate von 15 °C/min und einer Haltezeit von 30 min erzielt. Der höchste Ertrag an Spindelbiokohle wurde bei 300 °C, 5 °C/min und 30 min erreicht, was zu einem Biokohleertrag von 33,42% führte. Für die Lieschblattbiokohle wurde der höchste Ertrag von 30,69% bei 300 °C, 5 °C/min und 33 min erreicht. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigten, dass Biokohle aus Maisrückständen mit einem selbstspülenden Pyrolysereaktor hergestellt werden kann, der eine kostengünstige Anwendung für Entwicklungsländer darstellt.

Mathematische Modelle wurden etabliert um den Einfluss der Betriebsparameter Temperatur, Aufheizrate und Haltezeit auf den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen (VM), Aschegehalt (AC), pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit (EC) darzustellen. Die Temperatur zeigte den größten Einfluss auf die Biokohleeigenschaften. AC, pH und EC stiegen mit steigender Temperatur signifikant an ($p < 0,05$), während die VM abnahm. Die Haltezeit hatte weniger Einfluss auf die Reaktionen, während Einfluss der Aufheizrate zu vernachlässigen war. Unter den theoretisch optimalen Bedingungen hatte die Lieschblatt-

und Blattbiokohle einen höheren AC-Wert (11,42 und 26,55 %), einen höheren pH-Wert (10,96 und 11,51) und einen höheren EC-Wert (12,37 und 6,79 mS/cm), aber einen niedrigeren VM-Wert (7,38 und 8,39 %) als die von Spindel- und Stängelbiokohle. Die Schlussfolgerung ist, dass Lieschblatt- und Blattbiokohle für die Kompostierung unter den optimalen Pyrolysebedingungen von 600 °C, 5 °C/min, 90 min und 600 °C, 15 °C/min, 79 min besser geeignet sind. Der höchste C-Gehalt (72,58 bis 86,92%) wurde in Spindelbiokohle beobachtet, während der N-gehalt in Blattbiokohle höher war (1,11 bis 1,72%).

Maisspindelbiokohle wurde durch langsame Pyrolyse mit dem selbstspülenden Pyrolysereaktor hergestellt. Zu den Biokohlebehandlungen gehörten frische Biokohle (FB), getrocknete Biokohle (DB), gewaschene Biokohle (WB) und Biokohle-Wasserextrakt (WE). Es wurden Biokohleausbringungsmengen von 10, 20 und 30 t/ha bewertet. Signifikante phytotoxische Effekte von Spindelbiokohle wurden auf Keimungsraten, Trieblänge, Frischgewicht und Trockenmassegehalt beobachtet. Bei den FB- und WE-Behandlungen wurden schwere toxische Effekte festgestellt, die hohe Boden- und Umweltrisiken darstellen. Die DB und WB zeigten eine geringere Toxizität. Die Keimrate nach 48 h (GR₄₈) nahm mit zunehmender Biokohleausbringung in allen Behandlungen ab. Die beobachtete Leistungsreihenfolge der Biokohlebehandlungen für Keimung, Trieblänge und Triebfrischgewicht war für jede Biokohleausbringmenge WB>DB>WE>WE>FB, während die Reihenfolge für den Trieb-Trockenmassegehalt umgekehrt war. Bei frischer Spindelbiokohle erwiesen sich Waschen und Wärmebehandlung als einfache und effektive Methode zur Minderung der Phytotoxizität. Die Wahl einer wirtschaftlichen Biokohlebehandlung hängt von den Eigenschaften der Biokohle, den Ausbringungsmengen und den spezifischen Anforderungen der Anwendung ab. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Kombination von Waschen und Wärmebehandlung die Toxizität von Biokohle weiter reduzieren könnte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Herstellung von Biokohle aus Maisrückständen durch selbstspülende Pyrolyse ein vielversprechender Ansatz ist, um Biomasseabfälle zu verwerten und einen Mehrwert für landwirtschaftliche und umwelttechnische Anwendungen zu schaffen. Der selbstspülende Pyrolysereaktor sollte künftig auch zur Herstellung von Biokohle aus anderen Pflanzenrückständen getestet werden. Darüber hinaus sollten in zukünftigen Arbeiten andere Produkte (z.B. Bioöl und Pyrolysegas) aus der selbstspülenden Pyrolyse untersucht und bewertet werden. Zur Steigerung der Ernährungssicherung durch Bekämpfung der Bodendegradation auf der Grundlage der Verwendung von Maisrückständen im Pyrolyseprozess, sollte die Möglichkeit berücksichtigt werden, Biokohle als Bodenverbesserungsmittel einzusetzen und ein nachhaltiges Biokohleproduktionssystem aufzubauen.

Publications

Included in the doctoral dissertation

- Intani, K., Latif, S., Cao, Z., Müller, J., 2018a. Characterisation of biochar from maize residues produced in a self-purging pyrolysis reactor. *Bioresour. Technol.* 265, 224–235.
- Intani, K., Latif, S., Islam, M.S., Müller, J., 2018b. Phytotoxicity of Corncob Biochar before and after Heat Treatment and Washing. *Sustainability* 11, 30.
- Intani, K., Latif, S., Kabir, A.K.M.R., Müller, J., 2016. Effect of self-purging pyrolysis on yield of biochar from maize cobs, husks and leaves. *Bioresour. Technol.* 218, 541–551.

Other peer-reviewed papers

- Nagle, M., Intani, K., Romano, G., Mahayothee, B., Sardud, V., Müller, J., 2016. Determination of surface color of 'all yellow' mango cultivars using computer vision. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 9, 42–50.
- Tiyayon, P., Spreer, W., Wuttisathitthaworn, N., Lammawut, K., Karaj, S., Intani, K., Sringarn, K., Santasup, C., Müller, J., 2016. Analysis of biochar from different kinds of feedstock and varying pyrolysis temperature II: analysis of biochar from a local kiln. *J. Agric.* 32, 55–61.

Conference contribution

- Dietrich, C.C., Rahaman, A., Latif, S., Intani, K., Müller, J., Jablonowski, N.D., 2016. Effects of modified biochars on the growth of maize (*Zea mays* L.), in: *Tropentag Conference*. Vienna, Austria.
- Intani, Kiatkamjon, Cao, Z., Latif, S., Müller, J., 2015a. Characterisation of biochar from maize residues produced in lab-scale batch reactor without using carrier gas, in: *Tropentag Conference*. Berlin, Germany, p. 144.
- Intani, K., Islam, M.S., Latif, S., Müller, J., 2016. Characterisation of corn cob biochar and phytotoxic effects of different biochar treatments on seed germination of cress (*Lepidium sativum*), in: *24th European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE)*. Amsterdam, Netherlands, p. 43.
- Intani, K., Latif, S., Fink, C., Müller, J., 2017. Up-scaling a prototype top-lit up-draft pyrolysis (TLUD-Pyro) reactor, in: *25th European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE)*. Stockholm, Sweden.
- Intani, Kiatkamjon, Latif, S., Kabir, A.K.M.R., Müller, J., 2015b. Optimization of conditions for the production of biochar from maize residues without using carrier gas, in: *4th International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT 2015)*. Penang, Malaysia.
- Intani, K., Latif, S., Müller, J., 2015a. Improving a prototype top-lit up-draft pyrolysis (TLUD-Pyro) stove for household energy systems in developing countries, in: *Thermochemical Processing of Renewable Feedstock into Fuel, Chemicals and Polymers*. Kazan, Russia.

- Intani, K., Latif, S., Müller, J., 2015b. Developing a prototype top-lit up-draft pyrolysis (TLUD-Pyro) stove for improving household energy systems in rural Ethiopia, in: PLANT 2030 Status Seminar. Potsdam, Germany, p. 125.
- Intani, Kiatkamjon, Romuli, S., Munder, S., Wüst, D., Müller, J., 2015c. Optimisation of carbonization of wood chips using multi-purpose Top-lit Updraft Reactor (TLUD), in: Thermochemical Processing of Renewable Feedstock into Fuel, Chemicals and Polymers. Kazan, Russia.
- Latif, S., Awiszus, S., Intani, K., Müller, J., 2018. Pyrolysis of cassava peel in top-lit up-draft pyrolysis (TLUD-Pyro) reactor, in: 26th European Biomass Conference and Exhibition (EUBCE). Copenhagen, Denmark, p. 397.
- Latif, S., Intani, K., Müller, J., 2016. Slow pyrolysis of cassava peel by using a top-lit up-draft pyrolysis (TLUD-Pyro) reactor, in: 6th International Symposium on Energy from Biomass and Waste. Venice, Italy.
- Munder, S., Romuli, S., Intani, K., Wüst, D., Müller, J., 2015a. Byproducts for Bioenergy - advanced firewood substitution by simultaneous cooking and charring application, in: ICOS-International Conference on Soil. Tirana, Albanien.
- Munder, S., Romuli, S., Intani, K., Wüst, D., Müller, J., 2015b. Simultaneous biochar production and heat utilization from different biomass fuels using a TLUD reactor, in: ICOS-International Conference on Soil. Tirana, Albanien.
- Nagle, M., Intani, K., Mahayothee, B., Sardud, V., Müller, J., 2012a. Non-destructive mango quality assessment using image processing: inexpensive innovation for the fruit handling industry, in: Conference on International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development (Tropentag 2012). Göttingen, Germany, pp. 1-4.
- Nagle, M., Romano, G., Intani, K., Spreer, W., Mahayothee, B., Sardud, V., Müller, J., 2012b. A novel optical approach to monitor color changes of color peel for machine vision applications, in: International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng2012. Valencia, Spain.
- Schweikle, J., Spreer, W., Intani, K., Shafer, D.M., Tiyyon, P., Saehang, S., Santasup, C., Sringarm, K., Wiriya, W., Müller, J., 2015. In-field biochar production from crop residues: an approach to reduce open field burning in northern Thailand, in: Tropentag Conference. Berlin, Germany, p. 817.
- Tiyyon, P., Wuttisathittaworn, N., Lammawut, K., Spreer, W., Santasup, C., Sringarm, K., Karaj, S., Intani, K., Müller, J., 2015. Properties of bio-char from different feedstock produced in a low cost kiln, in: 1st International Conference on Asian Highland Natural Resources Management (AsiaHiLand) and 2nd IDRC-SEARCA Upland Fellowship and Conference. Chiang Mai, Thailand.