

Bilhate Chala

**Valorizing by-products from
primary coffee processing
through anaerobic fermentation**

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

Band 18/2020

Bilhate Chala

**Valorizing by-products from primary coffee
processing through anaerobic fermentation**

D 100 (Diss. Universität Hohenheim)

Shaker Verlag
Düren 2020

6. Summary

About 125 million people living in the tropics and sub-tropics rely on coffee production for their livelihood. Arabica and Robusta are common coffee species, with a share of 60% and 40% of the worldwide production, respectively. Arabica is native to the South-Western part of Ethiopia. The green bean yield (per plant and year) is 1.0–1.5 kg for Robusta and 0.5–0.8 kg for Arabica. By 2016, the total worldwide production of green coffee beans was about 9.2 million metric tons and the annual export volume was about 7.2 million tons (worth about 20 billion USD), which makes the commodity the second most traded item in the world next to petroleum.

Green coffee beans are produced by processing fresh cherries followed either by the wet-method or the dry-method. The pulp, mucilage (and waste water) and parchment are the major by-products generated in consequent steps from the wet-method; while the dry-method produces the husks as a single fraction by-product. The parchment, mucilage and pulp constitute about 6%, 12% and 43% of the fresh cherry weight, respectively. The husk represents nearly half the weight of the dry cherry. Both processing methods generate a substantial volume of by-products, which are introduced into the hosting environment without any significant economic benefit and thus have a negative impact on human health and aquatic biota.

In order to intensify the use of all parts of the coffee cherry in production and post-harvest value innovation and alleviate adverse environmental impact by disposing coffee processing by-products, it is important to valorise these by-products using biomass conversion technologies such as anaerobic fermentation. Therefore, this dissertation is organized in three parts: In Part-I the characterization and methane formation potential of coffee by-products was investigated in batch assay at 37 °C. The methane potentials thereof were applied to estimate the thermal/electric generation potential, in the context of the Ethiopian coffee production. In Part-II the anaerobic performance and stability of coffee husks and pulp was examined in a mesophilic continuous stirred tank reactor (CSTR) with and without the supplement of trace elements (TE) while increasing the OLR. In Part-III, two kinetic models (modified Gompertz and Logistic) were fitted to the batch anaerobic dataset from the husks, pulp and mucilage run at 21 °C, 30 °C and 37 °C; and were further analysed to include temperature as a new variable to the kinetic models.

The physico-chemical characterization of the pulp, husk, and mucilage showed similar cellulose contents. The lignin content was superior in the parchment (32%) than in the pulp

(15.5%) and husks (17.5%). The mucilage had the lowest hemicellulose (0.8%) and lignin (5%) contents. The elemental analysis of the coffee by-products showed a deficiency in some trace elements (TE), which are important for the performance and stability of the anaerobic fermentation. The BMP assay resulted in a SMY of 31, 159, 245 and 295 L kg⁻¹ VS from parchment, husk, pulp and mucilage, respectively. The SMY from the parchment indicates that the substrate is not suitable for biogas production. Based on the mean generation of coffee by-products in Ethiopia (2014-16) and considering the respective SMY, it was estimated that as much as 68×10^6 m³ methane could be recovered from the anaerobic fermentation of husks, pulp and mucilage; which could be converted to 238,000 MWh of electricity.

The performance of husks and pulp in CSTR with and without TE supplementation was studied on increasing OLRs (from 2.5 to 6.0 kg VS m⁻³ d⁻¹). The application of TE had an essential effect on the performance and stability of digesters. The SMY of pulp and husks was higher while supplemented with TE, particularly at higher OLRs. The effect of the TE application was observed in the suppressed concentration of the short chain volatile fatty acids and alkalinity ratio VFA/TIC (FOS/TAC in German literatures). Moreover, the TE supplementation promotes a higher OLR while maintaining stable anaerobic processes. Mono-digestion of husks and pulp could be an option for lower OLRs. Co-digestion with animal manure is an alternative to industrial TE formulas for a sustainable utilization of the coffee by-products.

The final methane yield from the batch assay of husks, pulp and mucilage at 21 °C, 30 °C and 37 °C reached similar values for each substrate, however, the required incubation time increased with the decreasing temperature. The modified Gompertz and Logistic models were applied to fit the experimental dataset and obtained kinetic parameters thereof. Yet both models do not have a temperature parameter, therefore the estimate of SMY was only applicable for specific fermentation temperatures. However, after our experiment, temperature became one of the parameters studied thus the models have been updated to be 'generalized' to estimate the methane yield at any temperature between 21 °C and 37 °C.

In general, research has shown the anaerobic fermentation as possible intervention in utilisation of by-products from coffee processing. Coffee processing facilities can make use of their own by-products to produce biogas and thus meet their energy needs. Moreover, the approach will alleviate the environmental burden from the current disposal practices of the by-products. The dissemination of a biogas technology in developing countries has economic, social and environmental benefits.

7. Zusammenfassung

Rund 125 Mio. Menschen in den Tropen und Subtropen sind für ihren Lebensunterhalt auf die Kaffeeproduktion angewiesen. Arabica und Robusta sind gängige Kaffeearten mit einem Anteil von 60% bzw. 40% an der weltweiten Produktion. Arabica stammt aus dem südwestlichen Teil Äthiopiens. Der Ertrag an grünen Bohnen (pro Pflanze und Jahr) beträgt 1,0–1,5 kg für Robusta und 0,5–0,8 kg für Arabica. Bis 2016 betrug die weltweite Gesamtproduktion von grünen Kaffeebohnen rund 9,2 Millionen Tonnen und das jährliche Exportvolumen rund 7,2 Millionen Tonnen (im Wert von rund 20 Milliarden USD), was sie neben Erdöl zum zweitmeist gehandelten Rohstoff der Welt macht.

Grüne Kaffeebohnen werden durch die Verarbeitung von frischen Kirschen entweder im Nassverfahren oder im Trockenverfahren gewonnen. Zellstoff, Schleimstoffe und die Pergamentschicht sind die wichtigsten Nebenprodukte, die in aufeinanderfolgenden Schritten bei der Nassmethode entstehen, während bei der Trockenmethode die Schalen als einziges Nebenprodukt entsteht. Pergament, Schleim- und Zellstoff machen etwa 6%, 12% bzw. 43% des Frischkirschengewichts aus. Die Schale stellt fast die Hälfte des Gewichts der Trockenkirsche dar. Beide Verarbeitungsmethoden erzeugen eine beträchtliche Menge an Nebenprodukten, die ohne wirtschaftlichen Nutzen in die nähere Umwelt gelangen und sich negativ auf die Gewässer und somit auf die menschliche Gesundheit auswirkt.

Um die Nutzung aller Teile der Kaffeekirsche in der Produktion und nach der Ernte zu intensivieren und negative Umweltauswirkungen durch die Entsorgung von Nebenprodukten der Kaffeeverarbeitung zu mindern, ist es wichtig, diese Nebenprodukte durch Biomasse-Umwandlungstechnologien wie die anaerobe Fermentation zu valorisieren. Diese Dissertation widmet sich dieser Problematik und ist in drei Teile gegliedert: In Teil-I wurde das Methanbildungspotenzial von Kaffeenebenprodukten im Batch-Assay Verfahren bei 37 °C untersucht. Das Methanpotential wurde zur Abschätzung des thermischen und elektrischen Energiepotenzials im Rahmen der äthiopischen Kaffeeproduktion verwendet. In Teil II wurde der Biogasertag und die Prozessstabilität von Kaffeenebenprodukten in einem mesophilen kontinuierlichen Rührkesselreaktor (CSTR) mit und ohne Zusatz von Spurenelementen (TE) unter Erhöhung des Substratdurchsatzes untersucht. In Teil III wurden zwei kinetische Modelle (Gompertz und Logistic) an den anaeroben Batch-Datensatz aus den bei 21 °C, 30 °C und 37 °C fermentierten Substraten angepasst und weiter analysiert, um die Temperatur als neue Variable in die kinetischen Modelle aufzunehmen.

Die physikalisch-chemische Charakterisierung von Zellstoff, Schale und Schleim zeigte ähnliche Cellulosegehalte. Der Ligningehalt war im Pergament (32%) höher als im Zellstoff (15,5%) und in den Schalen (17,5%). Der Schleim hatte den niedrigsten Hemicellulose (0,8%) und Ligningehalt (5%). Die Elementaranalyse der Kaffeenebenprodukte zeigte einen Mangel an einigen Spurenelementen (TE), die für die Leistung und Stabilität der anaeroben Fermentation wichtig sind. Der BMP-Assay ergab eine SMY von 31, 159, 245 und 295 L kg⁻¹ VS aus Pergament, Schale, Zellstoff und Schleim. Die SMY aus dem Pergament deutet darauf hin, dass das Substrat nicht für die Biogasproduktion geeignet ist. Basierend auf der durchschnittlichen Erzeugung von Kaffee-Nebenprodukten in Äthiopien (2014–16) und unter Berücksichtigung der jeweiligen SMY wurde geschätzt, dass bis zu 68 Mio. m³ Methan aus der anaeroben Fermentation von Schalen, Zellstoff und Schleim gewonnen werden können, die in 238.000 MWh Strom umgewandelt werden könnten.

Das Gasbildungspotential von Schalen und Zellstoff in CSTR mit und ohne TE-Supplementierung wurde bei zunehmenden OLR (von 2,5 auf 6,0 kg VS m⁻³ d⁻¹) untersucht. Der Einsatz von TE hatte einen wesentlichen Einfluss auf die Leistung und Stabilität der Fermenter. Bei der Zugabe von TE war der SMY von Zellstoff und Schalen höher, insbesondere bei höheren OLR. Der Effekt der TE-Anwendung wurde in der reduzierten Konzentration der kurzkettigen flüchtigen Fettsäuren und dem Alkalinitätsverhältnis FOS/TAC beobachtet. Darüber hinaus fördert die TE-Supplementierung eine höhere OLR bei gleichbleibend stabilen anaeroben Prozessen. Die Monofermentierung von Schalen und Zellstoff könnte eine Option für niedrigere OLRs sein. Die Kovergärung mit Tierdung ist für die nachhaltige Verwertung der Kaffeenebenprodukte eine Alternative zu industriellen TE-Präparaten.

Die finale Methanausbeute aus dem Batch-Assay von Schalen, Zellstoff und Schleim bei 21 °C, 30 °C und 37 °C erreichte für jedes Substrat ähnliche Werte, jedoch erhöhte sich die erforderliche Inkubationszeit mit sinkender Temperatur. Die modifizierten Gompertz- und Logistikmodelle wurden für die experimentellen Datensätze gefittet, um daraus die kinetischen Parameter abzuleiten. Beide Modelle berücksichtigten ursprünglich nicht die Temperatur im Fermenter, welche nun basierend auf den experimentellen Daten eingeführt werden konnte. Damit kann der Methanertrag bei beliebigen Temperaturen zwischen 21 °C und 37 °C berechnet werden.

Grundsätzlich haben die Untersuchungen gezeigt, dass die anaerobe Fermentation von Nebenprodukten aus der Kaffeeverarbeitung möglich ist. Kaffeeverarbeitungsbetriebe können somit eigene Nebenprodukte zur Produktion von Biogas nutzen und so ihren Energiebedarf decken. Darüber hinaus entlastet das Biogasproduktion die Umwelt bei entsprechender Änderung der gegenwärtigen Entsorgungspraxis. Somit birgt das Verfahren wirtschaftliche und ökologische Vorteile für Kaffeeanbau-Regionen.

8. Publications

Peer reviewed papers

1. Chala, B.; Oechsner, H.; Müller, J. Introducing temperature as variable parameter into kinetic models for anaerobic fermentation of coffee husk, pulp and mucilage. *Applied Sciences* **2019**, *9*, 412.
2. Chala, B.; Oechsner, H.; Latif, S.; Müller, J. Biogas potential of coffee processing waste in ethiopia. *Sustainability* **2018**, *10*, 2678.
3. Chala, B.; Oechsner, H.; Fritz, T.; Latif, S.; Müller, J. Increasing the loading rate of continuous stirred tank reactor for coffee husk and pulp: Effect of trace elements supplement. *Eng. Life Sci.* **2018**, *18*, 551-561.

Conference papers and report contributions

1. Chala, B.; Latif, S.; Oechsner, H.; Müller, J. Biogas yield potential of by-products from primary coffee processing, 2016 in proceedings 24th EUBCE-2016, 6 - 9 June 2016, Amsterdam, Netherlands
2. Chala, B.; Latif, S.; Müller, J., Potential of by-products from primary coffee processing as source of biofuels, 2015 in proceedings Tropentag 2015 "Plant 2030", 4 - 6 March 2015, Potsdam, Germany
3. Chala, B.; Oechsner, H.; Müller, J. Effect of TE application on bio-methane yield and process stability of digestion of coffee pulp and husk, 2016 in Annual report-2016 of the State Institute of Agricultural Engineering and Bioenergy, University of Hohenheim, Germany.