Schriftenreihe des Lehrstuhls für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen der Universität Hohenheim

Ana A. Salvatierra Rojas

Design, simulation and validation of an inflatable solar dryer for paddy rice in the Philippines

SHAKER VERLAG

Band 24/2021

16

UNIVERSITÄT HOHENHEIM

INSTITUT FÜR AGRARTECHNIK
Agrartechnik Tropen und Subtropen
Prof. Dr. Joachim Müller

Design, simulation and validation of an inflatable solar dryer for paddy rice in the Philippines

Dissertation

Submitted in fulfillment of the regulations for the degree of
"Doktor der Agrarwissenschaften"
(Dr.sc.agr. / Ph.D. in Agricultural Sciences)

to the
Faculty of Agricultural Sciences

presented by

Ana Alejandra Salvatierra Rojas
Born in Cochabamba, Bolivia

2021

Summary

Rice is one of the major staple foods worldwide, constituting about 25% of the total global cereal production in 2019. In many Asian countries, the provision of sufficient rice production is crucial to cover the growing population's demand. In the Philippines, a country not yet self-sufficient in rice production, the government plays an important role in regulating rice import tariffs and the provision of subsidies to the producers and consumers. However, more rice could be supplied locally if losses were tackled during production, processing, and storage.

In humid, tropical countries such as the Philippines, paddy rice is harvested with high moisture content. Sun drying remains the most common method of drying the rice, the success of which depends largely on high solar radiation availability. For safe storage, moist rice should generally be dried to 13-14% moisture content wet basis (MC_{wb}) within 24 hours. However, for a storage period of more than three months, drying to 10-12% MC_{wb} is recommended.

Sun drying has some serious disadvantages, such as exposure to uncontrolled high temperatures, birds, and insects, making mechanical dryers an attractive alternative. Many such dryers in the Philippines are mentioned in the literature. Currently, mechanical dryers in the Philippines use fossil fuels as the main source to heat the drying air, resulting in a dependency on fossil fuel supplies. However, the high fluctuation and overall increase of fossil fuel prices in the Philippines inhibit the use of mechanical dryers, especially for small-sized farms. Farmers' concerns about dryers are therefore related to high initial costs, high operating costs, and lack of capital. In addition, mechanical dryers are often not available in rural areas where rice is produced, increasing the losses due to transport from the farm to the milling facility.

These downsides mean that the integration of renewable resources as the main energy supply for drying, along with the introduction of more efficient dryers (low-cost, simple design, and broader use of renewable energy sources), makes sense both from an economic point of view and in terms of an environmentally friendly and sustainable drying operation. In sum, the development of solar dryers presents a viable alternative to a costly, often unreliable means of drying rice.

Overall, three approaches were taken to develop a solar dryer for paddy rice: (i) generation of comprehensive information of the influence of paddy rice's radiative properties, which is an important factor that tells us the relation of energy absorbed and reflected by the paddy rice, (ii) development of a solar dryer solution for paddy rice, and (iii) investigation of the airflow distribution across the dryer via CFD simulation, and modeling the dryer's performance to evaluate its potential use for drying paddy rice in the Republic of the Philippines.

In the first study, the influence of the radiative properties such as albedo of paddy rice was evaluated. Albedo (reflection) is an important factor that provides insights into the ratio of absorbed and reflected solar radiation. The study was carried out in the Philippines to establish the surface albedo's impact on sun drying paddy rice. First, a semi-empirical model was found to best represent paddy rice albedo in relation to the solar zenith angle. Then, the albedo model was integrated into a 1D model describing the heat and mass transfer during sun drying of paddy rice. MATLAB/Simulink® was used to solve the ordinary differential equations. A sensitivity analysis was performed to investigate the effects of albedo on the accuracy of the sun drying model. Finally, field experiments at the International Rice Research Institute (IRRI) were used to validate the simulation outputs. The model is in good agreement with experimental data and shows that the albedo model's integration improves the model accuracy. This knowledge applies to solar drying technology, which allows the drying process to be analyzed more deeply.

In the second study, it was possible to develop a simple solar dryer design, the inflatable solar dryer (ISD), in collaboration with the International Rice Research Institute and Grainpro Philippines Inc. The ISD is manufactured with a transparent UV-treated polyethylene film and a reinforced polyvinyl chloride film joined by a heavy-duty zipper. A lightweight multilayer floor was used to further minimize heat loss. Two axial fans are mounted at one end of the tunnel to inflate the dryer. A special mixing device was developed to mix the grains inside the dryer.

The ISD is divided into two areas, the heating area, and the drying area. The drying process starts by unzipping the plastic films and spreading the paddy rice in the drying area. Afterwards, the two plastic films are zipped up, and the fans are turned on to inflate the dryer. The mixing device is rolled under the dryer to mix the paddy rice every hour during the daytime.

The ISD was tested over two consecutive seasons. Parallel to the drying experiments with the ISD, sun drying and shade drying practices were performed to investigate their drying effect and rice quality preservation. The MC_{wb} using the ISD decreased from 23% to 14% within 26-52 h of continuous operation during the rainy season and 16% to 14% within 4-26 h of drying during the dry season. In both seasons, the final MC_{wb} was 12% after the rice was allowed to dry for a prolonged time, while the target MC_{wb} for the sun drying was not reached.

In the third study, the ISD airflow distribution was simulated using computational fluid dynamics (CFD) via ANSYS Fluent. In addition, a thermal model was developed in MATLAB/Simulink®, coupling heat transfer in the heating area and heat and mass transfer in the drying area. The models were validated with field experiments using both models. The simulated temperatures and moisture content in the ISD showed high accuracy (MAPE < 10%) with the experimental data. The validated model was used to predict the ISD's performance under different weather conditions in the Philippines. The outputs provide information on the dryer capacity during the peak harvest period of paddy rice in the dry and rainy seasons. Furthermore, the model demonstrates the potential of the ISD to dry agricultural products and that it is worth being adopted as a decision tool for the improvement of the ISD design. At the same time, the model can be applied to predict the drying performance of other agricultural products in the ISD.

Zusammenfassung

Reis ist eines der wichtigsten Grundnahrungsmittel weltweit und macht etwa 25 % der gesamten globalen Getreideproduktion im Jahr 2019 aus. In vielen asiatischen Ländern ist die Versorgung mit einer ausreichenden Reisproduktion entscheidend, um den Bedarf der wachsenden Bevölkerung zu decken. Auf den Philippinen, einem Land, das sich noch nicht selbst mit Reis versorgt, spielt die Regierung eine wichtige Rolle bei der Regulierung der Reisimportzölle und der Gewährung von Subventionen für die Produzenten und Verbraucher. Es könnte jedoch mehr Reis lokal geliefert werden, wenn die Verluste bei der Produktion, Verarbeitung und Lagerung verringert würden.

In feuchten, tropischen Ländern wie den Philippinen wird Paddy-Reis mit hohem Feuchtigkeitsgehalt geerntet. Die Sonnentrocknung ist nach wie vor die gängigste Methode zur Trocknung von Reis, für deren Erfolg eine hohe verfügbare Sonneneinstrahlung ausschlaggebend ist. Für eine sichere Lagerung sollte feuchter Reis im Allgemeinen innerhalb von 24 Stunden auf 13-14 % Feuchtigkeitsgehalt (MC_{wb}) getrocknet werden. Bei einer Lagerdauer von mehr als drei Monaten wird jedoch eine Trocknung auf 10-12 % MC_{wb} empfohlen.

Die Sonnentrocknung hat einige gravierende Nachteile, wie z. B. die Gefahr von unkontrolliert hohen Temperaturen, Vögeln und Insekten, was mechanische Trockner zu einer attraktiven Alternative macht. Viele solcher Trockner auf den Philippinen sind in der Literatur erwähnt. Derzeit verwenden mechanische Trockner auf den Philippinen fossile Brennstoffe als primäre Quelle zur Erwärmung der Trocknungsluft, was zu einer Abhängigkeit von der Versorgung mit fossilen Brennstoffen führt. Die hohe Fluktuation und der allgemeine Anstieg der Preise für fossile Brennstoffe auf den Philippinen hemmen jedoch den Einsatz mechanischer Trockner, insbesondere für kleine Betriebe. Die Bedenken der Landwirte gegenüber Trocknern beziehen sich daher auf die hohen Anschaffungskosten, die hohen Betriebskosten und den Mangel an Kapital. Darüber hinaus sind mechanische Trockner in den ländlichen Gebieten, in denen Reis produziert wird, oft nicht verfügbar, was die Verluste beim Transport von der Farm zur Mühle erhöht.

Diese Nachteile sind der Grund dafür, dass die Integration von erneuerbaren Ressourcen als Hauptenergiequelle für die Trocknung neben der Einführung von effizienteren Trocknern (kostengünstig, einfaches Design und breitere Nutzung von erneuerbaren Energiequellen) sowohl aus wirtschaftlicher Sicht als auch im Hinblick auf einen umweltfreundlichen und

nachhaltigen Trocknungsbetrieb sinnvoll ist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entwicklung von Solartrocknern eine praktikable Alternative zu einer kostspieligen, oft unzuverlässigen Methode der Reistrocknung darstellt.

Insgesamt wurden drei Ansätze verfolgt, um einen Solartrockner für Rohreis zu entwickeln: (i) Generierung umfassender Informationen über den Einfluss der Strahlungseigenschaften von Paddy-Reis, einem wichtigen Faktor, der Aufschluss über das Verhältnis der vom Paddy-Reis absorbierten und reflektierten Energie gibt, (ii) Entwicklung einer solaren Trocknerlösung für Paddy-Reis und (iii) Untersuchung der Luftstromverteilung über den Trockner mittels CFD-Simulation und Modellierung der Leistung des Trockners, um seine potenzielle Verwendung zum Trocknen von Paddy-Reis in den Philippinen zu bewerten.

In der ersten Studie wurde der Einfluss der Strahlungseigenschaften wie zum Beispiel die Albedo von Paddy-Reis bewertet. Die Albedo (Reflexion) ist ein wichtiger Faktor, der Aufschluss über das Verhältnis von absorbierter und reflektierter Sonnenstrahlung gibt. Die Studie wurde auf den Philippinen durchgeführt, um den Einfluss der Oberflächenalbedo auf die Sonnentrocknung von Paddy-Reis zu ermitteln. Zunächst wurde ein semi-empirisches Modell gefunden, das die Albedo von Paddy-Reis in Abhängigkeit vom solaren Zenitwinkel am besten darstellt. Dann wurde das Albedo-Modell in ein 1D-Modell integriert, das den Wärme- und Stofftransport während der Sonnentrocknung von Rohreis beschreibt. MATLAB/Simulink® wurde verwendet, um die gewöhnlichen Differentialgleichungen zu lösen. Eine Sensitivitätsanalyse wurde durchgeführt, um die Auswirkungen der Albedo auf die Genauigkeit des Sonnentrocknungsmodells zu untersuchen. Schließlich wurden Feldexperimente am International Rice Research Institute (IRRI) zur Validierung der Simulationsergebnisse herangezogen. Das Modell stimmt gut mit den experimentellen Daten überein und zeigt, dass die Integration des Albedo-Modells die Modellgenauigkeit verbessert. Diese Erkenntnisse lassen sich auf die solare Trocknungstechnologie anwenden, wodurch der Trocknungsprozess tiefer analysiert werden kann.

In der zweiten Studie konnte in Zusammenarbeit mit dem International Rice Research Institute und Grainpro Philippines Inc. ein einfaches Solartrocknerdesign, der aufblasbare Solartrockner (ISD), entwickelt werden. Der ISD wird aus einer transparenten, UV-behandelten Polyethylenfolie und einer verstärkten Polyvinylchloridfolie hergestellt, die durch einen strapazierfähigen Reißverschluss verbunden sind. Ein leichter Mehrschichtboden wurde verwendet, um den Wärmeverlust weiter zu minimieren. Zwei Axialventilatoren sind an einem Ende des Tunnels angebracht, um den Trockner zu

aufzublasen. Eine spezielle Mischvorrichtung wurde entwickelt, um die Körner innerhalb des Trockners zu mischen.

Der ISD ist in zwei Bereiche unterteilt, den Heizbereich und den Trocknungsbereich. Der Trocknungsprozess beginnt mit dem Öffnen der Kunststofffolien und dem Ausbreiten des Rohreises im Trocknungsbereich. Danach werden die beiden Kunststofffolien mit einem Reißverschluss verschlossen und die Ventilatoren eingeschaltet, um den Trockner aufzublasen. Die Mischvorrichtung wird unter den Trockner gerollt, um den Paddy-Reis tagsüber jede Stunde zu mischen.

Der ISD wurde in zwei aufeinanderfolgenden Saisonen getestet. Parallel zu den Trocknungsversuchen mit dem ISD wurden Sonnentrocknungs- und Schattentrocknungsversuche durchgeführt, um deren Trocknungseffekt und den Erhalt der Reisqualität zu untersuchen. Der MC_{wb} mit dem ISD sank von 23% auf 14% innerhalb von 26-52 h Dauerbetrieb während der Regenzeit und von 16% auf 14% innerhalb von 4-26 h Trocknung während der Trockenzeit. In beiden Jahreszeiten lag der endgültige MC_{wb} bei 12 %, nachdem der Reis für längere Zeit getrocknet wurde, während der Ziel- MC_{wb} für die Sonnentrocknung nicht erreicht wurde.

In der dritten Studie wurde die ISD-Luftstromverteilung mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) über ANSYS Fluent simuliert. Außerdem wurde ein thermisches Modell in MATLAB/Simulink® entwickelt, das die Wärmeübertragung im Heizbereich und die Wärme- und Massenübertragung im Trocknungsbereich koppelt. Beide Modelle wurden mit Feldversuchen validiert. Die simulierten Temperaturen und Feuchtigkeitsgehalte im ISD zeigten eine hohe Genauigkeit (MAPE < 10 %) mit den Versuchsdaten. Das validierte Modell wurde verwendet, um die Leistung des ISD unter verschiedenen Wetterbedingungen auf den Philippinen vorherzusagen. Die Ergebnisse liefern Informationen über die Trocknerleistung während der Haupterntezeit von Rohreis in der Trocken- und Regenzeit. Darüber hinaus zeigt das Modell das Potenzial des ISD zur Trocknung landwirtschaftlicher Produkte und dass es sich lohnt, es als Entscheidungshilfe für die Verbesserung des ISD-Designs einzusetzen. Gleichzeitig kann das Modell angewendet werden, um die Trocknungsleistung anderer landwirtschaftlicher Produkte im ISD vorherzusagen.

Publications

Peer review papers

Salvatierra-Rojas, A., Ramaj, I., Romuli, S., V., Müller, J., 2021. CFD-Simulink modeling of the Inflatable Solar Dryer for drying paddy rice. Appl. Sci. 2021, 11(7), 3118; https://doi.org/10.3390/app11073118

Salvatierra-Rojas, A., Torres-Toledo, V., Müller, J., 2020. Influence of Surface Reflection (Albedo) in Simulating the Sun Drying of Paddy Rice. Appl. Sci. 2020, 10(15), 5092, https://doi.org/10.3390/app10155092

Salvatierra-Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M., de Bruin, T., Müller, J., 2017. Development of an inflatable solar dryer for improved postharvest handling of paddy rice in humid climates. Published to International Journal Agriculture and Biology and Engineering, Vol. 10 No.3 269. DOI: 10.3965/j.ijabe.20171003.2444

Conference papers

Salvatierra-Rojas, A., Gummert, M., de Bruin, T., Müller, J., Cabardo, C. 2018. Smart Inflatable solar dryer optimization for greater performance. *Presented at 5th International Rice Congress.* 15th – 17th October 2014, Los Banos Laguna, Philippines.

Salvatierra Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M. de Bruin, T., Müller, J., 2016. Smart Power Management of the Inflatable Solar Dryer. *In proceedings Tropentag 2016: International Research and Food Security, Natural Resource Management and Rural Development. Solidarity in a competing world – fair use of resources0.* 18th – 21st September, Vienna, Austria.

Salvatierra Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M. de Bruin, T., Müller, J., 2014. Innovative Inflatable Solar Dryer for tropical countries. *Presented at International Conference on Solar Energy Technology in Development Cooperation - OTTI.* 6th – 7th November. Frankfurt, Germany.

Salvatierra Rojas, A. Nagle, M., Gummert, M. de Bruin, T., Müller, J., 2014. Development and performance evaluation of a new solar dryer with force convection for paddy rice in the Philippines. *Presented at 4th International Rice Congress.* 27th October – 1st November 2014, Los Banos Laguna, Philippines.

Salvatierra Rojas, A. Nagle, M., Gummert, M. de Bruin, T., Müller, J., 2013. Optimisation of Solar Dryer for Paddy Rice. *Presented at the 3rd Annual Global Rice Science Partnership. (GRiSP) and Young Rice Scientists (YRS).* 15-18 October, Los Banos Laguna, Philippines.

Salvatierra Rojas, A. Nagle, M., Gummert, M. de Bruin, T., Müller, J., 2013. Optimisation of Solar Drying for Paddy Rice in the Philippines. *In proceedings Tropentag 2013: International Research and Food Security, Natural Resource Management and Rural Development.* 17-19 September, Stuttgart, Germany.

Salvatierra Rojas, A. Nagle, M., Gummert, M. de Bruin, T., Müller, J., 2012. Solar drying concept for rice in the Philippines. Presented at *IRRI Young Scientists, Sustaining Excellence in Rice Research Conference.* 8-10 October, Los Banos Laguna, Philippines.

Salvatierra Rojas, A. Nagle, M., Gummert, M. de Bruin, T., Müller, J., 2012. Development of a solar greenhouse dryer concept for rice. *In proceedings Tropentag 2012: "Resilience of agricultural systems against crisis".* 19-21 September, Göttingen, Germany.