

Diss. ETH No. 21821

HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN A SOLAR BIOMASS GASIFIER

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

MICHAEL KRÜSI

MSc ETH ME

born 09.10.1985

citizen of Schönengrund (AR)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Aldo Steinfeld, examiner

Prof. Dr. Claudio Augusto Oller do Nascimento, co-examiner

Dr. Zoran R. Jovanovic, co-examiner

2014

Abstract

This thesis investigates the production of synthesis gas, a mixture of hydrogen and carbon monoxide, via steam-based thermochemical gasification of biomass using concentrated solar energy for process heat.

Energy and exergy analyses of the gasification of Brazilian sugarcane bagasse revealed the potential benefits of solar-driven over conventional autothermal gasification that include the superior quality of the syngas and the higher yield per unit of feedstock. Theoretical upgrade factors (ratio of the energy content of syngas produced over that of the feedstock) of up to 126%, along with the treatment of wet feedstock and the elimination of the air separation unit, support the potential benefits of solar-driven over autothermal gasification.

Reaction rates for the gasification of fast pyrolyzed bagasse char were measured by thermogravimetric analysis and a rate law based on the oxygen exchange mechanism was formulated.

A two-zone laboratory-scale allothermal gasifier that combines drop-tube and fixed-bed concepts was developed with the aim to provide pyrolysis and gasification conditions yielding high carbon conversion into syngas and low amounts of tar and gaseous hydrocarbons. In the upper drop-tube zone, a high radiative heat flux to the dispersed particles induces their fast pyrolysis. In the lower zone, a fixed bed provides sufficient residence time and temperature for the char gasification and the decomposition of the other pyrolysis products. Testing was performed in an electric furnace. Experimental runs at reactor temperatures of 1073–1573 K and a biomass feed rate of 2.8 g/s-m² yielded high-quality syngas of molar ratios H₂/CO = 1.6 and CO₂/CO = 0.31, and with lower heating values of 15.3–16.9 MJ/kg, resulting in an upgrade factor of 112%.

The two-zone reactor concept was then further developed and a solar reactor was built and evaluated experimentally using simulated concentrated solar energy at a 1.5 kW solar input scale. In order to enhance the heat transfer to the lower char gasification zone, the fixed bed was replaced by a trickle bed established by a structured packing made of well conducting reticulate porous ceramic (RPC) foam. The packing provides residence time for the solids and enhances the heat transfer for the efficient char gasification and for the decomposition of the hydrocarbons. A series of 20 min gasification experiments comparing the two-zone reactor vs. a drop-tube reactor were performed with a maximum particle flux of 16 g/s-m^2 . It has been demonstrated that the former allows for more efficient decomposition of CH_4 and C_2 hydrocarbons at comparable reactor temperatures. The LHV of the product gas was around 15.9 MJ/kg , thus significantly higher than those typically obtained in conventional autothermal gasifiers. Solar energy was chemically stored in the product gas resulting in an upgrade factor of 105% and a maximum energy conversion efficiency of 21%. An analysis of the heat losses of the reactor identified the main losses via conduction through the insulation and along the reactor tube.

To study the heat and mass transfer in the trickle-bed zone of the two-zone reactor, an externally heated gas-solid trickle-flow reactor with a RPC packing was tested with beech char particles in a series of 43–51 min long experiments achieving carbon conversions of up to 52%. A two-dimensional finite volume model coupling chemical reaction with conduction, convection, and radiation of heat within the porous structure was developed and tested against experimentally observed temperatures and gasification rates. The sensitivity of the gasification rate and reactor temperatures to variations of the RPC's pore diameter, porosity, thermal conductivity, and particle loading was studied. Furthermore, a numerical comparison with a moving bed demonstrated that the increased heat transfer via combined radiation and conduction leads to a more uniform temperature distribution and higher gasification rates.

Zusammenfassung

Die vorliegende Doktorarbeit untersucht die Herstellung von Synthesegas, einer Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, durch thermochemische Dampfvergasung von Biomasse mithilfe konzentrierter Sonnenenergie als Prozesswärme.

Eine energetische und exergetische Evaluierung der Dampfvergasung von brasilianischer Zuckerrohr-Bagasse zeigt die potenziellen Vorteile der solar betriebenen gegenüber der herkömmlichen autothermen Vergasung auf. Diese umfassen die überlegene Qualität des Synthesegases sowie die höhere Ausbeute pro Biomasseeinheit. Die theoretische Erhöhung des Energiegehalts des Synthesegases gegenüber dem Ausgangsstoff von 26%, sowie die sich eröffnenden Möglichkeiten feuchte Biomasse zu verwenden und auf eine Luftzerlegungsanlage zu verzichten unterstreichen die potentiellen Vorteile der solarbetriebenen gegenüber der herkömmlichen Vergasung.

Die Reaktionsraten der Vergasung von schnell pyrolysiertes Bagassekohle wurden durch thermogravimetrische Analyse gemessen. Daraus wurde dann ein Geschwindigkeitsgesetz auf der Grundlage des Sauerstoff-Austausch-Mechanismus formuliert.

Ein Zweizonenvergaser im Labormassstab, der Fallrohr- und Festbettkonzepte kombiniert, wurde mit dem Ziel entwickelt, Pyrolyse- und Vergasungsbedingungen zu schaffen, die für einen hohen Umsatz der Kohle zu Synthesegas sowie für geringe Mengen Teer und gasförmiger Kohlenwasserstoffe sorgen. In der oberen Fallrohrzone induziert ein hoher Strahlungswärmefluss die schnelle Pyrolyse der dispergierten Biomassepartikel. In der unteren Zone stellt ein Festbett genügend lange Feststoffverweilzeiten und genügend hohe Temperaturen für die Kohlevergasung und die Zersetzung der anderen Pyrolyseprodukte zur Verfügung. Die experimentellen Tests wurden an einem Elektroofen bei Temperaturen im Bereich 1073–1573 K und Biomasseströmen von 2.8 g/s-m^2

durchgeführt. Dabei wurde qualitativ hochwertiges Synthesegas mit molaren H_2/CO - und CO_2/CO -Verhältnissen von 1.6 bzw. 0.31 sowie Heizwerten von 15.3–16.9 MJ/kg produziert. Dies entspricht einer Erhöhung des Energiegehalts gegenüber dem Ausgangsstoff um 12%.

Das Zweizonen-Reaktorkonzept wurde dann weiterentwickelt und es wurde ein Solarreaktor gebaut und experimentell unter simulierter konzentrierter Sonnenenergie bei Eingangsleistungen bis 1.5 kW getestet. Um den Wärmetransport in der untenliegenden Kohlevergasungszone zu verbessern wurde das Festbett durch ein Rieselbett ersetzt. Das Rieselbett wurde mithilfe einer strukturierten Packung aus netzartiger poröser Keramik mit guter Wärmeleitfähigkeit realisiert. Die Packung schafft genügend hohe Feststoffverweilzeiten und erhöht den Wärmetransport für eine effiziente Kohlevergasung und die Zersetzung der Kohlenwasserstoffe. Zum Vergleich des Zweizonen-Reaktors mit einem Fallrohrreaktor wurde eine Serie 20-minütiger Vergasungsexperimente mit maximalen Feststoffmassenflüssen von 16 g/s-m^2 durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass der erstere bei vergleichbaren Temperaturen eine effizientere Zersetzung von CH_4 und C_2 -Kohlenwasserstoffen erlaubt. Der Heizwert des Produktgases war mit 15.9 MJ/kg signifikant höher als die typischerweise in konventionellen autothermen Vergasern erreichten Werte. Solarenergie konnte erfolgreich chemisch im Produktgas gespeichert werden. Die Erhöhung des Energiegehalts des Synthesegases gegenüber dem Ausgangsstoff betrug 5%. Dabei wurde eine maximale Energieumsatzeffizienz von 21% erreicht. Mit einer Wärmeverlustranalyse des Solarreaktors wurden die Wärmeleitung durch die Isolation sowie entlang des Reaktorrohres als die grössten Verluste identifiziert.

Um den Wärme- und Stofftransport im Rieselbett des Zweizonen-Reaktors genauer zu untersuchen wurde ein extern beheizter Gas-Feststoff-Rieselbettreaktor mit einer porösen Keramikpackung in einer Serie von 43–51-minütiger Experimente mit Buchenholzkohlengreis getestet. Dabei wurde ein Kohlenstoffumsatz von 52% erreicht. Es wurde ein zweidimensionales Finite-Volumen-Modell für Wärmeübergang und Stofftransport entwickelt. Dieses koppelt die chemische Reaktion mit dem Wärmetransport innerhalb der porösen Struktur durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung. Die Modell-

vorhersagen wurden mit den im Reaktor gemessenen Temperaturen und Vergasungsraten verglichen. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt den Einfluss von Veränderungen des Porendurchmessers, der Porosität, der Wärmeleitfähigkeit und der Partikelbeladung des RPC's auf die Vergasungsrate und die Reaktortemperaturen. Ein numerischer Vergleich mit einem Wanderbettreaktor demonstrierte, dass die Erhöhung des Wärmetransports durch kombinierte Wärmeleitung und -strahlung zu einer gleichmässigeren Temperaturverteilung sowie höheren Vergasungsraten führt.