

Diss. ETH Nr. 14040

Beitrag zur Modellierung der Festbettverbrennung in automatischen Holzfeuerungen

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
Doktor der Technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

CHRISTIAN BRUCH
Dipl.-Ing.
Universität Hannover
geboren am 7. April 1970
in Düsseldorf, Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. D. Poulidakos, Referent
Prof. Dr. U. Müller, FZ Karlsruhe, Koreferent

Zürich 2001

Kurzfassung

Die mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe verbundene CO_2 -Problematik erfordert in Zukunft eine verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen. In der Schweiz kommt hierbei der Holzenergie, als zweitwichtigstem erneuerbaren Energieträger nach der Wasserkraft, eine besondere Rolle zu. Die Verbrennung von Energieholz in schüttgutartiger Form, wie z.B. Holzschnitzeln, in Anlagen bis zu einigen MW thermischer Leistung wird meist in Festbettfeuerungen realisiert. Hierbei wird der Brennstoff im Bett zunächst vergast und das entstandene Rohgas anschließend mit der Sekundärluft umgesetzt. Trotz technischer Verbesserungen der Anlagen in den letzten Jahren, weisen diese nach wie vor ein Optimierungspotenzial hinsichtlich der Verbesserung des Wirkungsgrades und einer Reduktion der Schadstoffemissionen auf.

Neben Experimenten stellen numerische Berechnungsansätze auf Basis von Computational Fluid Dynamics (CFD) Programmen eine Möglichkeit zur Optimierung von Verbrennungsprozessen dar. Für die Berechnung von reaktiven Gasströmungen sind heute kommerzielle Programme verfügbar. Zur Beschreibung des Verbrennungsvorgangs von Holz im Festbett existiert hingegen kein allgemein gültiges Modell. Bisherige Ansätze basieren auf der Annahme homogener Verteilungen von Temperatur und Spezies über die einzelnen Brennstoffpartikel und erfordern somit die Verwendung makrokinetischer Daten, die von Bedingungen wie Aufheizrate, Brennstofffeuchtigkeit und Temperatur abhängig sind. Diese Modelle sind daher nicht auf andere Betriebsbedingungen übertragbar.

Zur Untersuchung der Einflussgrößen auf den Abbrand einer Schüttung aus Holzpartikeln wird daher in der vorliegenden Arbeit ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem die Verwendung makrokinetischer Daten vermieden wird. Das hier realisierte Modell basiert auf der Aufteilung der Schüttung in eine endliche Anzahl von Brennstoffpartikeln und die umgebende Gasphase. Dabei werden die abbrennenden Partikel mit einem transienten, eindimensionalen Ansatz beschrieben. Die Strömung durch die Schüttung wird als Strömung durch ein poröses Medium behandelt. Das Partikelmodell ist über den Wärme- und Stoffaustausch mit der Gasphasenströmung durch die Schüttung gekoppelt.

Zur Untersuchung eines abbrennenden Buchenholzpartikels wurde in der Arbeit ein Versuchsreaktor aufgebaut. Vergleiche von experimentellen Daten und mit dem Partikelmodell berechneten Werten zeigen eine gute Übereinstimmung, so dass die eindimensionale Beschreibung der Transportvorgänge im Brennstoffpartikel zulässig ist. Innerhalb der Schüttung werden die Wärmetransportprozesse Konvektion, Leitung und Strahlung getrennt erfasst. Wie Vergleiche mit experimentellen Untersuchungen zeigen, kann der Aufheiz- und Trocknungsvorgang einer durchströmten Schüttung gut beschrieben werden. Für eine abbrennende Holzschüttung liefert das partikel aufgelöste Berechnungsmodell eine plausible Vorhersage des Brennstoffumsatzes in der Schüttung, ohne dass makrokinetische Daten oder empirisch ermittelte Korrekturen notwendig sind.

Abstract

An increasing use of renewable energy sources is an important issue in a future energy market to solve the CO_2 -problem. In Switzerland wood combustion is, apart from hydro-power, the most important renewable energy source, with a contribution of 2.5 % to the total energy demand. Usually, wood chips in automatic furnaces burn in a packed bed arrangement, where the combustion process consists of two phases: the packed bed, where the solid fuel is converted into the raw gas and the gas phase, representing the combustion of the raw gas with secondary air. Despite the improvement of wood furnaces in the past years, a potential for optimization with respect to reduced emissions and higher efficiencies remains.

For the optimization of combustion processes Computational Fluid Dynamics (CFD) have become a useful tool, employed together with experiments. While commercial CFD-codes can be applied for investigation of the flow conditions in the gas phase, no general model for calculation of solid fuel conversion in a packed bed exists.

Therefore the goal of the present work is to develop a numerical model to predict the conversion of solid fuel particles in a bed. The model should be applicable for a wide range of packed bed problems, thus the different processes in the bed have to be taken into account to cover the influence of fuel characteristics and operation parameters.

Within the model, the packed bed consists of a finite number of particles, whose individual processes are resolved by a particle model, applicable to each particle in the bed. The one dimensional and transient particle model is coupled to the gas phase in the porous bed by heat and mass transfer. For description of the gas flow through the bed, a second model is introduced.

For experimental investigation of a single beech wood particle a reactor has been built up within the present study. By the application of the single particle model, it can be shown that the main rate limiting parameters are captured, excluding the need of macrokinetic data for the conversion process in the model formulation. For the processes limited by heat transfer, such as pyrolysis and drying, the assumption of homogeneous temperature distribution does not hold, emphasizing the need for discretization of the single particles, as realized here.

Results obtained so far for a packed bed of wood particles show good agreement for the values of solid conversion in a packed bed compared to experimental results. The developed model reveals the distribution of temperature and species in the bed and within the raw gas emitted from the bed.