

Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico – experimentales

Biomass gasification process: theoretical and experimental studies a review

Juan Pérez^{1}, David Borge², John Agudelo¹*

¹Grupo de manejo eficiente de la energía – GIMEL, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 67 Número 53-108, Medellín, Colombia

²Simelec S.L., Departamento de Proyectos e I+D+i. San Andrés del Rabanedo, 185-San Andrés del Rabanedo 24191- León, España.

(Recibido el 3 de marzo de 2009. Aceptado el 23 de septiembre de 2009)

Resumen

La situación energética y medioambiental mundial hace que la generación de energía mediante sistemas basados en energías renovables tome cada vez una mayor relevancia. Estos sistemas tienen una doble ventaja ya que posibilitan la diversificación energética y reducen la dependencia del petróleo a la vez que se disminuyen las emisiones globales de CO₂. La biomasa es uno de los recursos energéticos con mayor potencial tanto en países desarrollados como emergentes pero sigue sin sufrir el desarrollo esperado. La gasificación de biomasa es uno de los sistemas con gran potencial ya que permite la generación tanto de energía térmica como eléctrica, mediante tecnologías de bajo costo como los gasificadores de lecho fijo (potencias medias – bajas), o reactores de lecho fluidizado con tecnología más exigente y con mayor capacidad de generación. La transformación de la biomasa en un combustible gaseoso, aprovechable en motores de combustión interna alternativos o en turbinas de gas como combustible, exige que la biomasa atraviese varios procesos termoquímicos, compuestos por reacciones endotérmicas (secado, devolatilización y reducción) y exotérmicas (oxidación de volátiles y carbón). La selección de un gasificador requiere conocer las propiedades de la biomasa, mientras que el diseño del mismo exige conocer el fenómeno termoquímico por completo. El objetivo de este trabajo es presentar una revisión actualizada de los diferentes planteamientos tanto teóricos como experimentales desarrollados para estudiar el proceso de gasificación de biomasa, tanto en lecho fijo como en lecho fluidizado, con miras a diseñar gasificadores de biomasa.

* Autor de correspondencia: teléfono: +57 + 4 + 219 85 49, fax: +57 + 4 + 211 05 07, correo electrónico: juanpb@udea.edu.co (J. F. Pérez).

----- *Palabras clave:* Energías renovables, gasificación, biomasa, lecho fijo, lecho fluidizado

Abstract

Each day the energy systems relying on renewable resources are more relevant in the world energy politics due to the fossil energy and environmental crisis. These systems increase energy resources of countries, reduce the oil dependency, and diminish CO₂ global emissions. Biomass is one of the renewable resources with higher potential in developing and developed countries. Biomass gasification has huge possibilities to be developed. Such as fixed bed gasifiers, or fluidized bed reactors with more technology demanding and more power capacity. Biomass transformation in a gaseous fuel to be used in a reciprocating internal combustion engine or gas turbines requires that biomass passes through several thermochemical stages. Endothermic reactions (drying, pyrolysis and reduction) and exothermic process (volatiles and carbon oxidation). To select a specific gasifier it is necessary to know biomass properties (chemical and physical), whereas to design a reactor it is necessary to know and understand the complete phenomena. The aim of this work is to show an actualized review about different theoretical and experimental approaches to study biomass gasification process in fixed and fluidized bed reactors in order to design biomass gasifiers.

----- *Keywords:* Renewable energy, gasification, biomass, fixed bed, fluidized bed

Introducción

La generación de energía eléctrica mediante energías renovables toma cada vez un mayor interés a nivel global. Los sistemas de gasificación/combustión de residuos sólidos bien sea de origen forestal, agrícola o urbanos se enmarcan dentro del desarrollo sostenible, tanto en los países desarrollados como en los emergentes, ya que se integran con planes de manejo integral de residuos sólidos, generando energía eléctrica, disminuyendo la dependencia energética de combustibles derivados del petróleo y reduciendo las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

La gasificación es uno de los procesos que aporta mayor valor añadido a la generación energética mediante biomasa, al permitir la obtención de un gas que puede ser utilizado tanto para la generación de energía térmica como eléctrica, incluyendo la combinación de ambos procesos (mediante

sistemas de cogeneración). El desarrollo de este tipo de equipos está ligado al establecimiento de modelos que permitan caracterizar el proceso de gasificación tanto desde el punto de vista de balances de materia, energía y exergía como modelos que permitan diagnosticar el desempeño del proceso a partir de medidas experimentales del proceso en tiempo real.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que se transforma un combustible sólido en uno gaseoso. El proceso está conformado por varios fenómenos complejos que van desde los mecanismos de transferencia de masa y energía en un sistema reactivo heterogéneo, derivando las etapas de secado y devolatilización del combustible, para dar paso a la oxidación de los volátiles y el carbón, con el consecuente cambio del diámetro de las partículas y las pérdidas de presión en el lecho. En este artículo se presenta una revisión de los principales modelos de gasificación tanto ce-

ro-dimensional (0-D) como dimensionales, cuyo trabajo supone un aporte en el campo del desarrollo científico y tecnológico, con miras a desarrollar una tecnología propia para la generación distribuida en Colombia con motores de combustión interna alternativos, que utilicen como combustible el gas pobre de gasificación de biomasa.

El estudio del proceso de gasificación bajo un planteamiento 0-D, se basa en equilibrio químico y termodinámico, que relaciona variables de entrada y salida con el fin de predecir la composición final del gas pobre y la temperatura de equilibrio en función de parámetros como el tipo de biomasa (análisis elemental e inmediato), poder calorífico, la humedad, el dosado relativo de gasificación (relación combustible - aire), entre otros. Para determinar la evolución de diferentes parámetros del proceso termoquímico a través de su paso por el gasificador se utilizan modelos dimensionales en una, dos o tres dimensiones, según el nivel de complejidad y tiempo computacional que se desee invertir en las simulaciones. El estudio de la evolución de las especies existentes, su estado térmico y dinámico requiere de cálculos acoplados de cinética química, fenómenos de transporte de masa, energía y movimiento.

Gasificación de biomasa en instalaciones experimentales

Una de las alternativas para investigar el proceso de gasificación de biomasa es la caracterización del proceso a partir de datos experimentales obtenidos en plantas piloto, industriales o sistemas a escala de laboratorio. Zainal *et al.* [1], estudian el efecto en el poder calorífico y la tasa de producción de gas pobre al variar la relación combustible - aire en una planta de generación de energía eléctrica utilizando un gasificador de lecho fijo en equicorriente alimentado con residuos de madera acoplado a un conjunto motor-generator demostrando que la humedad de la biomasa, el flujo de aire, el tamaño de la partícula, la posición de la entrada de aire en el gasificador y el volumen de la zona de reducción influyen en la calidad del gas pobre obtenido, obteniendo rendi-

mientos energéticos del proceso del 80% con una eficiencia global del sistema produciendo energía eléctrica que varía entre 10 y 11% con consumos específicos de biomasa de $2 \text{ kgkW}^{-1}\text{h}^{-1}$.

Warren *et al.* [2] comprobaron que tamaños de partícula inferiores a 2 mm deben evitarse en los gasificadores de lecho fijo en equicorriente ensayados ya que provocan elevadas pérdidas de carga, disminuyendo la cantidad de aire disponible en la zona de oxidación, lo que reduce la calidad del gas pobre obtenido a la vez que se incrementa el contenido de alquitranes en el gas. Los ensayos fueron realizados con trozos de madera, alcanzando un rendimiento global del proceso del 20% con un consumo específico de combustible de $1 \text{ kgkW}^{-1}\text{h}^{-1}$. Mukunda *et al.* [3], presentan resultados para dos plantas de 3,5 y 80 kW, cuyo consumo específico de biomasa es del orden de $1,3 \text{ kgkW}^{-1}\text{h}^{-1}$, obteniendo rendimientos globales de la planta de generación de energía entre 15 y 18%, permitiendo reemplazar el 70% del combustible diesel utilizado en estas plantas. De manera similar Dasappa *et al.* [4], estudian el reemplazo de combustible diesel encontrando que un litro de combustible diesel es reemplazado por 3 o 3,3 kg de biomasa.

El efecto de la velocidad superficial del aire en un gasificador de lecho fijo en equicorriente invertido a escala de laboratorio (50 mm de diámetro y 400 mm de longitud) fue estudiado por Reed *et al.* [5], analizando como éste parámetro afecta la formación de alquitranes, carbón residual y la tasa de producción de gas pobre. El estudio arrojó que aumentos de la velocidad superficial originan una reducción del carbón sin reaccionar y del contenido de alquitranes en el gas debido a la mayor temperatura de reacción durante las fases endotérmicas. En una instalación similar Tinaut *et al.* [6] determinan la velocidad de avance del proceso, la cual varía entre 5 y 20 mm/min, para dosados relativos de gasificación entre 1,5 y 3,0.

Por otro lado Henrisken *et al.* [7] han evaluado por períodos de operación prolongados (más de 465 horas), una planta de generación de energía eléctrica compuesta por un gasificador de doble

etapa de lecho fijo en equicorriente y un conjunto motor – generador. En el proceso en continuo se gasificó biomasa con una humedad del 40%, obteniéndose un gas pobre con una composición en gases combustibles del 33% de H_2 , 15% de CO, 2-3% de CH_4 , con un rendimiento global de la planta de gasificación del 25%.

Rao *et al.* Realizaron un análisis termodinámico en una planta de gasificación de lecho fijo en contracorriente [8] para tres tipos de combustibles sólidos diferentes; residuos sólidos urbanos, residuos de madera y soja comprobándose que las irreversibilidades oscilan entre 27 y 29%. Lapuerta *et al.* [9], evaluaron el desempeño de un gasificador de lecho arrastrado bajo condiciones de gasificación y cogasificación obteniendo eficiencias del proceso de gasificación que varían entre 30 y 50%.

Modelado del proceso de gasificación

Modelos Cero-Dimensional (0-D)

Los modelos Cero-Dimensionales son aquellos que relacionan variables de entrada y salida prediciendo la composición final del gas pobre obtenido y la temperatura de equilibrio en función de parámetros de entrada, tales como el tipo de biomasa, la humedad, el dosado, la temperatura, entre otros.

Zaina *et al.* [10] desarrollaron un modelo de un gasificador de lecho fijo en equicorriente basado en el equilibrio. El estudio concluyó que el poder calorífico del gas se reduce al aumentar la temperatura en la zona de gasificación y la humedad de la biomasa. Un modelo basado en la minimización de la energía libre de *Gibbs* fue desarrollado por Altafini y Mirandola [11] para la gasificación del carbón. El modelo se usó para estudiar cómo afectan el flujo másico, análisis elemental, poder calorífico superior del carbón, la relación combustible - aire, tipo de agente gasificante (aire, oxígeno o vapor de agua), caso adiabático o isotérmico, en la composición del gas de síntesis. Los autores obtuvieron que aumentos en la can-

tidad de vapor de agua en el agente gasificante originan una reducción en la temperatura de llama adiabática. También se observa que el incremento en la relación oxígeno/carbón genera una reducción del poder calorífico del gas de síntesis obtenido, al generar mayores temperaturas de reacción acercando el proceso más a combustión. Altafini *et al.* [12] simula el proceso de gasificación de biomasa en un gasificador de lecho fijo en equicorriente asumiendo que el gas obtenido no contiene alquitranes. Consideran pérdidas de calor del 1% y se estudia cómo influye la humedad de la biomasa (oscilando entre 0 y 30%), así como en la relación combustible – aire, en la composición y el poder calorífico del gas pobre obtenido. A medida que aumenta la cantidad de humedad en la biomasa se incrementa la relación aire/combustible para lograr mantener constante la temperatura de reacción en torno a los 800 °C lo que incrementa el contenido de N_2 y CO_2 en el gas pobre reduciendo a su vez el contenido de CO (lo que disminuye el poder calorífico del gas pobre). Utilizando un modelo similar Rashidi [13] predice la composición de los productos de combustión de un hidrocarburo mediante la minimización de energía libre de *Gibbs*. Modelos cinéticos que simulan el proceso de enfriamiento del gas pobre han sido desarrollados por Lapuerta *et al.* [14]; éste modelo se basa en el equilibrio químico y utiliza las constantes de equilibrio para determinar la temperatura de congelación comprobando que el aumento del dosado relativo provoca un aumento del poder calorífico. Un modelo similar fue utilizado por Hernández [15] para estudiar a nivel experimental y teórico el comportamiento del gas en procesos de combustión, tiempos de retraso, y velocidades de combustión laminar y turbulenta. Schuster *et al.* [16] estudiaron el efecto de la composición del combustible y las condiciones de operación de un gasificador de lecho fluidizado con recirculación de una fracción del gas pobre, en la cantidad, composición, contenido energético del gas y rendimiento energético del proceso suponiendo despreciable la formación de alquitranes a la vez que considera que las pérdidas de calor suponen el 5% de la potencia disponible a la entrada del proceso.

El modelo evidencia que aumentos en la cantidad de agente gasificante genera la disminución del rendimiento del proceso debido a la no recuperación de la entalpía de evaporación del vapor. Además se observa que el aumento del contenido de humedad en la biomasa deriva la disminución del poder calorífico del gas pobre como consecuencia del mayor contenido de vapor de agua en el gas pobre, y el aumento de la energía necesaria para evaporar el agua en el interior del gasificador. Simulaciones sobre el proceso de gasificación de biomasa en sistemas de lecho fluido, tanto circulante como burbujeante, fueron realizados por Ruggiero y Manfrida [17] utilizando un modelo que permite estudiar el proceso de gasificación variando los parámetros de entrada al modelo (análisis elemental de la biomasa, aire, oxígeno, vapor de agua, presión, estado térmico, temperatura o caso adiabático o pérdidas de calor). Para simular el comportamiento de una planta de gasificación en lecho fluido circulante utilizando carbón, Li *et al.* [18] desarrollaron un modelo basado en equilibrio químico. El modelo plantea balances de materia y energía introduciendo un factor empírico que permite corregir la cinética relacionando los porcentajes de conversión del carbón reales y teóricos. El poder calorífico del gas pobre obtenido disminuye a medida que se incrementa la cantidad de aire como consecuencia del incremento en el porcentaje de conversión del carbón con el consiguiente aumento de CO_2 y disminución de la concentración de CO , CH_4 y H_2 .

Modelos de diagnóstico

Los modelos que a partir de los gases de emisión caracterizan el proceso de combustión en función de los parámetros de entrada reciben el nombre de modelos de diagnóstico [19, 20] y son aquellos que midiendo la concentración de O_2 en los gases de emisión, conociendo la composición del combustible, asumiendo combustión completa y una reacción con exceso de aire, permiten determinar el dosado relativo con que se ha llevado a cabo el proceso de combustión. En caso de que la combustión no haya sido completa la formación de otros componentes puede despreciarse. Exis-

ten muy pocos modelos de este tipo en la bibliografía para la gasificación de biomasa. Un modelo de diagnóstico y monitorización del proceso ha sido establecido por Majanne *et al.* [21], quienes utilizan como entradas la medición de flujos, las temperaturas y presiones del proceso, permitiendo detectar algunas fallas y al mismo tiempo suministrar información acerca del proceso, desde el punto de vista termoquímico. Melgar *et al.* [19], presentan un modelo que permite diagnosticar el proceso de gasificación en tiempo real, así como monitorerar y almacenar datos sobre las variables que caracterizan el proceso. Estas variables de proceso se determinan a partir de la composición y el flujo volumétrico del gas pobre, y de las temperaturas registradas en el proceso. Realizando algunas hipótesis que simplifican el modelo se pueden determinar los principales parámetros asociados al proceso tales como la tasa de consumo de biomasa, el dosado relativo de gasificación, la eficiencia térmica, la potencia térmica generada en el reactor, entre otros.

Modelos bidimensionales (2D)

Para el desarrollo de modelos bidimensionales se ha utilizado de forma muy habitual la experimentación en procesos de combustión de residuos sólidos urbanos (en adelante RSU). Yang *et al.* realizaron estudios de combustión de RSU en un lecho móvil [22], cuyos datos experimentales se utilizaron para validar un modelo bidimensional (2D) transitorio de dicho proceso. Los autores presentan un modelo transitorio que considera el lecho como un medio continuo poroso dividiendo el proceso de incineración en subprocesos de secado, pirólisis, combustión de volátiles y del carbón. Este modelo considera el efecto difusivo de las ecuaciones de conservación de masa para las diferentes especies gaseosas, área del reactor y fracción libre constante. La transferencia de calor tiene en cuenta los fenómenos de convección, conducción y radiación (flujos de intensidad de radiación), además consideran los modelos de transferencia de energía en fase sólida y están contemplados por la ecuación de conservación de energía en el sólido. En este modelo se utilizan las

ecuaciones de conservación del movimiento en las dos direcciones (modelo 2D) para determinar las velocidades en ambas fases. El modelo se ha validado con datos experimentales obtenidos en la instalación experimental de lecho fijo descrita en [23] con resultados satisfactorios entre la pérdida de masa del lecho y el campo de temperaturas. Las composiciones de los gases obtenidos (CO_2 y O_2) son muy diferentes a lo que el modelo predice, este hecho se atribuye a que durante la experimentación se forman caminos preferentes de aire. El mismo autor y sus colaboradores utilizan el modelo bidimensional descrito en [22] para estudiar los procesos de gasificación y combustión de RSU en un combustor de parrilla móvil (caldera) a lo largo y alto de toda su geometría. Los autores consideran que el paso de un fenómeno de combustión a gasificación implica la reducción de los metales pesados evaporados a la atmósfera a la vez que se aumenta la vida útil de los equipos y disminuye la temperatura de reacción y con ello las emisiones de NO_x a la atmósfera. El modelo se utiliza para evaluar y comparar con el caso experimental la tasa de quemado, la composición del gas, la temperatura y eficiencia del proceso en función de parámetros reales de operación del combustor comprobando que un sistema de gasificación debe utilizar tiempos de residencia del combustible del doble de lo habitual para así obtener rendimientos similares o superiores [24]. Yang *et al.* [25] utilizan el modelo bidimensional descrito en [22, 24] para estudiar la conversión de RSU y biomasa en un lecho de parrilla móvil a escala industrial. Comparando los dos combustibles sólidos ensayados se observa que el tiempo de ignición es menor en el caso de la biomasa que en los RSU y que la tasa de devolatilización de biomasa es dos veces mayor que la de los RSU debido a que posee mayor contenido en materia volátil, y por lo tanto menor contenido en humedad y cenizas.

Modelos unidimensionales (1D)

Modelos transitorios

El proceso de combustión de residuos sólidos mediante un modelo unidimensional heterogéneo

en estado transitorio ha sido estudiado por Shin y Choi [26]. Los autores consideran la devolatilización del combustible, la oxidación del carbón, volátiles y monóxido de carbono; estudian cómo influye la tasa de suministro de aire, el poder calorífico del combustible y el tamaño de partícula en el proceso y tienen en cuenta la intensidad de radiación como método de transferencia de calor por radiación en el lecho. Yang *et al.* [27, 28] estudiaron la influencia de las tasas de cinética química del proceso de pirólisis, la variación de la tasa de suministro de aire y el contenido de humedad del combustible en el proceso de combustión de residuos sólidos, utilizando para ello un modelo unidimensional heterogéneo en estado transitorio que considera las etapas de secado, devolatilización, oxidación de volátiles, alquitranes y carbón. La transferencia de calor por radiación se modela como la transferencia de la intensidad de la radiación. El mismo autor junto con sus colaboradores utilizan el modelo descrito en [28] sobre la misma instalación experimental observando que los combustibles secos tienen una tasa de quemado más elevada que aumenta con la tasa de aire primario hasta llegar al punto en el que los efectos de convección tienen una magnitud mucho más elevada que la energía liberada en el proceso. Se comprueba que los datos experimentales arrojan tasas de consumo de combustible menores a las estimadas por el modelo, comportamiento que los autores atribuyen a la formación de caminos preferentes durante el proceso experimental. Si se aumenta el caudal de aire y humedad, se reduce de forma considerable la concentración de monóxido de carbono y aumenta la concentración de oxígeno a la salida del reactor [27].

Yang *et al.* [23] estudian el efecto del tamaño de la partícula de biomasa, utilizando cubos de biomasa de cuatro tamaños diferentes (5, 10, 20 y 35 mm), en el proceso de combustión tanto en un planteamiento experimental como teórico utilizando el mismo modelo que en casos anteriores [27-29], pero considerando que el lecho está dividido en tres zonas; zona gaseosa, zona de interacción sólido-gas y zona en el interior de las partículas (partículas no isotérmicas) lo que implica

que si se produce un aumento en el diámetro de las partículas varía la distribución de temperaturas en el interior del sólido con las consiguientes variaciones en las tasas de secado y de pirólisis. Di Blasi [30], desarrolla un modelo transitorio para gasificadores de lecho fijo en equicorriente; dicho modelo acopla las ecuaciones de conservación a los procesos de evaporación del agua, pirólisis, combustión y gasificación del carbón, combustión de fase gas y craqueo térmico de alquitranes; la transferencia de energía en el lecho se describe mediante mecanismos de convección sólido-gas, sólido-paredes y gas-paredes [31-33]. La misma autora describe un modelo transitorio del proceso de gasificación en un lecho fijo en contracorriente que simula la estructura de los frentes de reacción y el comportamiento de un gasificador a escala de laboratorio [34].

La deducción de un modelo unidimensional en estado transitorio del proceso de gasificación de biomasa con vapor de agua en lecho fluidizado fue descrita por Sadaka *et al.* [35-37] con el objetivo de determinar cuál es la distribución de temperaturas y las especies existentes a lo largo del gasificador. Petersen y Wherter [38] elaboran un estudio teórico-experimental del proceso de gasificación de lodos de depuradora en un lecho fluidizado circulante utilizando un modelo unidimensional. La composición del gas pobre obtenido se calcula en equilibrio y el modelo considera el secado y la devolatilización del combustible como un proceso paralelo. Se evalúa la composición de la fase gaseosa, el reformado del metano, la oxidación-gasificación del carbón para determinar la composición del gas pobre a lo largo de todo el lecho y estimar las constantes cinéticas de los procesos involucrados en la gasificación de los lodos de depuradora para poder utilizarlas en posteriores modelos cinético-químicos.

Modelos estacionarios

No existen muchas referencias en la literatura que describan modelos unidimensionales en estado estacionario del proceso de gasificación en lechos fijos en equicorriente, cuando ésta condición es

la que predomina en los sistemas de gasificación una vez alcanzan el estado estable. Una combinación del equilibrio (zona de combustión-pirólisis) y un modelo unidimensional ha sido establecido por Jayah *et al.* [39] con el fin de estudiar la composición y la temperatura a lo largo de la zona final del gasificador en función de parámetros de diseño del reactor y variables del proceso. Giltrap *et al.* [40] consideran que la temperatura del sólido y del gas son iguales para así desarrollar un modelo homogéneo unidimensional en estado estacionario de la zona de reducción de un gasificador en equicorriente. Los autores consideran además la reducción del hidrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua con el carbón y la consiguiente oxidación de este último.

Adicionalmente, consideran el reformado del metano y predicen la composición del gas y la influencia del grado de reactividad del carbón en la temperatura. De un modo similar Babu y Sheth [41] estudian la influencia del grado de reactividad del carbón con la temperatura y la composición del gas a lo largo del lecho en la zona de reducción de un gasificador de lecho fijo en equicorriente. Un modelo que considera la radiación solar concentrada, con las consiguientes aplicaciones a una generación basada en la integración de varias energías renovables, es presentado por Belghit *et al.* [42]. El tipo de gasificador elegido fue de lecho móvil en equicorriente y los autores consideran la transferencia de calor por radiación en el lecho utilizando el modelo descrito por Rohsenow *et al.* [43], donde la transferencia de calor en lechos empacados se modela considerando el fenómeno de la conductividad radiativa en función de la temperatura al cubo (T^3). Tinaut *et al.* [6] desarrollan un modelo unidimensional que puede simular procesos termoquímicos estacionarios o transitorios, según el submodelo de transferencia de calor lecho-paredes que se elija. Un modelo unidimensional en estado estacionario del proceso de gasificación/combustión de carbón en lecho fijo en contracorriente ha sido desarrollado por De Souza-Santos [44] que considera las etapas de secado, pirólisis, oxidación y reducción

del combustible sólido. Hobbs *et al.* [31, 32, 45] desarrollaron un modelo unidimensional heterogéneo en estado estacionario del proceso de gasificación del carbón que tiene en cuenta la fracción libre del lecho variable, el secado, la devolatilización, oxidación y gasificación del carbón, considerando equilibrio parcial para la fase gaseosa. En este caso el modelo utilizado para la transferencia de calor es el descrito para convección en lechos empacados por De Wasch y Froment [46, 47] y por Froment y Bischoff [48, 49]. El modelo planteado por Hobbs *et al.* [31, 32] fue mejorado por Radulovic *et al.* [33] ya que contempla un submodelo del proceso de devolatilización y la opción de considerar el gas en equilibrio térmico y químico parcial o total. Sobre el modelo planteado en [33], Ghani *et al.* [50] desarrollan un estudio de sensibilidad que evalúa la influencia de algunas variables del modelo y los parámetros del proceso en la composición del gas y en la temperatura en ambas fases. Bryden y Ragland [51] utilizan un modelo estacionario del proceso de combustión de biomasa en un gasificador en contracorriente invertido utilizando trozos de biomasa de 20 cm de diámetro y no considerando la radiación en el lecho prediciendo el comportamiento del reactor en función de la altura del lecho, la temperatura del aire, el contenido de humedad de la biomasa y el tamaño de partícula. Un modelo estacionario unidimensional del proceso de gasificación que contempla como hipótesis principal el efecto de difusión de masa como fenómeno que gobierna las reacciones en fase heterogénea de oxidación y gasificación del carbón, es utilizado por Kayal *et al.* [52, 53] para predecir la composición del gas, la conversión del sólido y la temperatura en las dos fases.

Existen modelos simplificados como el desarrollado por Corella *et al.* [54] para estado estacionario del proceso de gasificación en lecho fluidizado que consideran la devolatilización del combustible, la reducción del vapor de agua con el carbón, el reformado de alquitranes y la reacción agua-gas (conocida también como *water-gas shift reaction*). Estos modelos investigan la

influencia de la temperatura del proceso y de la relación vapor/biomasa en la composición del gas pobre obtenido y en la cantidad de carbón sin reaccionar en el proceso. El mismo autor en colaboración con Sanz [55, 56] plantea un modelo que adiciona un mecanismo de reacción más complejo y balances de energía para predecir la composición del gas pobre, el contenido de alquitranes y carbón en función de los parámetros de control del proceso. Estos planteamientos han sido utilizados de forma similar por varios autores como Hamel y Krumm [57], y Oliva [58].

Modelos catalíticos del proceso de gasificación

No existen muchas referencias de estudios catalíticos que evalúen la posibilidad de utilizar catalizadores que mejoren el proceso de gasificación de la biomasa. Arauzo *et al.* [59] evalúan cómo evoluciona el fenómeno de pirólisis y gasificación de biomasa en el seno de un reactor catalítico de níquel modificado. Un estudio a aplicaciones industriales realizado por Aznar *et al.* [60] propone un gasificador de biomasa lignocelulósica en lecho fluidizado con vapor utilizando reformadores de vapor catalíticos. Una de las líneas de investigación más novedosas contempla el uso de CO₂ como agente gasificante en lugar de aire. En esta línea García *et al.* [61] estudian el efecto de la catálisis del Ni/Al coprecipitados para producir la gasificación de residuos de pino a bajas temperaturas. Estas tecnologías de baja temperatura permiten optimizar el balance energético de los gasificadores al necesitar temperaturas de operación mucho menores con las consiguientes ventajas aportadas al desarrollo de gasificadores de escala industrial.

Modelos del proceso de devolatilización (pirólisis)

El proceso de devolatilización de biomasa es una etapa crítica en la gasificación ya que consiste en la liberación de los volátiles existentes en el combustible sólido quedando por lo tanto una

matriz sólida de carbón vegetal y cenizas. Los modelos Lagrangianos son utilizados por Bryden *et al.* [62] para desarrollar un modelo cinético que considera el secado y la recondensación de la humedad, donde se plantea que el proceso de pirólisis está compuesto por tres reacciones primarias paralelas y dos reacciones secundarias de craqueo de los alquitranes en volátiles y carbón. Del mismo modo Hagge y Bryden [63] utilizan un modelo muy similar para estudiar la influencia del tamaño de la biomasa en el proceso de pirólisis. Otro planteamiento Lagrangiano es utilizado por Zoulalian *et al.* [64] para simular los mecanismos de transferencia de masa y energía asociados a un proceso de devolatilización de madera. Este modelo se utiliza para predecir la pérdida de masa y la temperatura interior en la partícula. El uso de técnicas termogravimétricas permite establecer modelos del proceso de forma sencilla. Lapuerta y sus colaboradores utilizaron datos experimentales de ensayos termogravimétricos con tamaños de partículas de 500 μm [65] y de 5 mm [66] para desarrollar un algoritmo de cálculo de las constantes cinéticas del proceso de pirólisis. El planteamiento está basado en tres reacciones paralelas de primer orden y aborda tres fenómenos en el proceso: secado, descomposición de la hemicelulosa y la celulosa, y una etapa final de descomposición de la lignina. Borge [67] realizó un estudio termogravimétrico para evaluar la influencia del tamaño de partícula de biomasa en el proceso de devolatilización utilizando para ello una instalación termogravimétrica experimental. Se comprueba que para tamaños de biomasa utilizados a nivel comercial la temperatura de descomposición aumenta con el tamaño mientras que la cinética del proceso disminuye como consecuencia de los fenómenos de difusividad térmica y másica. Un modelo para describir la degradación térmica de una partícula de biomasa en atmósfera oxidante fue descrito por Porteiro *et al.* [68]. Un aporte adicional ha sido presentado por Thunman *et al.* [69] al desarrollar un modelo cero dimensional que resuelve las ecuaciones de conservación de masa y energía, cerrando el modelo con datos empíricos para predecir la

composición de los volátiles pirolizados. Brunch *et al.* [70] utilizaron un modelo que simula la conversión de biomasa en lechos empacados; el modelo está basado en un planteamiento Lagrangiano que considera los fenómenos de secado, pirólisis de la biomasa, gasificación y oxidación del carbón.

Modelos de transferencia de calor por radiación en lecho fijo

En un gasificador de biomasa el fenómeno de transmisión de calor que gobierna el secado y la devolatilización de la biomasa es la radiación por lo que el modelo utilizado para el mismo es decisivo en la exactitud y convergencia de las simulaciones. Bruch *et al.* [70] consideran que la transferencia de calor por radiación en el seno del gasificador es un proceso complejo en el que intervienen fenómenos de absorción, reflexión y emisión. La biomasa lignocelulósica, por su propia composición, posee una conductividad térmica muy baja por lo que el mecanismo de conducción apenas tiene relevancia en el fenómeno de transmisión de energía en el lecho. La deducción de la ecuación de transferencia de energía por radiación en un medio participativo fue desarrollada por Modest [71] presentando varios métodos de solución aproximada del fenómeno entre los que se destaca el método de aproximación de *Schuster-Schwarzschild*. Este mismo método de aproximación es utilizado por Gosman y Lockwood [72] para simular la transferencia de calor por radiación en un quemador estacionario de gas, utilizando un modelo bi-dimensional. Argento y Bouvard [73] utilizan un modelo unidimensional estacionario de transferencia de calor por radiación determinando las propiedades radiativas en un medio poroso. Este modelo se utiliza para determinar la intensidad radiativa en ambas direcciones (en el sentido positivo y negativo de la coordenada geométrica considerada) en el interior del medio, relacionando ambas intensidades mediante la conductividad radiativa, la cual es a su vez función de los coeficientes de absorción y dispersión del medio poroso.

Conclusiones

Los modelos existentes aportan diferentes ventajas e inconvenientes a la hora de simular el comportamiento y funcionamiento de un equipo de gasificación de biomasa. Los modelos adimensionales se utilizan como un sistema de caja negra mediante el uso de las ecuaciones de conservación de energía, masa y ecuaciones auxiliares (constantes de equilibrio) que permiten cerrar el modelo. Estos planteamientos permiten predecir el comportamiento de las plantas de gasificación y estudiar los límites termodinámicos que estos equipos pueden alcanzar, investigando cómo afectan los parámetros de entrada el rendimiento del proceso. Permiten evaluar diversos parámetros de entrada tales como el análisis elemental del combustible, contenido de humedad de la biomasa, la relación aire/combustible y los fenómenos de intercambio de calor en el proceso (pérdidas de energía, precalentamientos y caso adiabático) con bajos tiempos computacionales.

Los modelos dimensionales son herramientas computacionales que permiten gran versatilidad a la hora de estudiar el proceso de gasificación, ya que es posible simular de manera acertada cualquier tipo de combustible lignocelulósico con diferentes tamaños de partícula y poder calorífico; se pueden evaluar diferentes tipos de agente gasificante, temperatura de entrada y caudal; además, es posible investigar el efecto del diseño térmico y geométrico de los reactores en el proceso, lo que convierte tales planteamientos en herramientas de apoyo para el diseño de gasificadores.

Los modelos dimensionales existentes tienen aspectos comunes que se presentan a continuación:

- Utilizan la hipótesis de tamaño de partícula uniforme.
- Se utilizan los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección en sistemas no reactivos.
- Se supone un secado instantáneo y mecanismos de reacción química muy simplificados.
- Se aplica la hipótesis de flujo paralelo (o de pistón) para las fases sólidas y gaseosas.
- En las reacciones heterogéneas se aplican modelos de segregación de cenizas.
- Se asume una fracción libre del lecho constante.
- Los desarrollos se aplican principalmente a sistemas de laboratorio y apenas existen modelos de sistemas industriales.
- Apenas existen análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo.
- Existe una gran diversidad de constantes cinéticas químicas tanto para reacciones homogéneas como heterogéneas.
- Existe gran variedad de constantes cinéticas en función del tamaño de partícula.

Referencias

1. Z. Zainal, A. Rifau, G. Quadir, K. Seetharamu. "Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 23. 2002. pp. 283-289.
2. T. Warren, R. Poulter, R. Parfitt. "Converting biomass to electricity on a farm-sized scale using downdraft gasification and a spark-ignition engine". *Bioresour Technol*. Vol. 52. 1995. pp. 95-98.
3. H. S. Mukunda, S. Dasappa, U. Shrinivasa. *Open top wood gasifiers*. T.B. Johanson, H. Kelly, A.K.N. Reddy, R. H. Williams, (eds.), Renewable Energy, Sources for Fuels and Electricity. Ed. Island Press. 1993. pp. 699-728.
4. S. Dasappa, H. V. Sridhar, G. Sridhar, P. J. Paul, H. S. Mukunda. "Biomass gasification - a substitute to fossil fuel for heat application". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 25. 2003. pp. 637-649.
5. T. Reed, R. Walt, S. Ellis, A. Das, S. Deutch. "Superficial velocity - the key to downdraft gasification". *Fourth Biomass Conference of the Americas, Oakland, USA*. 1999. pp. 343-356.
6. F. V. Tinaut, A. Melgar, J. F. Pérez, A. Horrillo. "Effect of biomass particle size and air superficial velocity

- on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier. An experimental and modelling study”. *Fuel Processing Technology*. Vol. 89. 2008. pp. 1076-1089.
7. U. Henriksen, J. Ahrenfeldt, T. Kvist, B. Gobel, J. Dall, C. Hindsgaul, L. Holst. “The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier”. *Energy*. Vol. 31. 2006. pp. 1542-1553.
 8. M. Rao, S. Singh, M. Sodha, A. K. Dubey, M. Shyam. “Stoichiometric, mass, energy and exergy balance analysis of countercurrent fixed-bed gasification of post-consumer residues”. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 27. 2004. pp. 155-171.
 9. M. Lapuerta, J. J. Hernández, A. Pazo, J. López. “Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions”. *Fuel Processing Technology*. Vol. 89. 2008. pp. 828-837.
 10. Z. Zainal, R. Ali, C. Lean, K. Seetharamu. “Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials”. *Energy Conversion and Management*. Vol. 42. 2001. pp. 1499-1515.
 11. C. R. Altafini, A. Mirandola. “A chemical equilibrium model of the coal gasification process based on the minimization of the gibbs free energy”. *Florence World Energy Research Symposium-FLOWERS97*. Florence (Italy) 1997. pp. 123-128.
 12. C. Altafini, P. Wander, R. Barreto. “Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model”. *Energy Conversion and Management*. Vol. 44. 2003. pp. 2763-2777.
 13. M. Rashidi. “Calculation of equilibrium composition in combustion products”. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 48. 1998. pp. 103-109.
 14. M. Lapuerta, J. J. Hernández, F. V. Tinaut, A. Horrillo. “Thermochemical behaviour of producer gas from gasification of lignocellulosic biomass in SI engines”. *SAE Technical Paper, Ser.* 2001-01-3586. 2001. pp. 88-95.
 15. J. J. Hernández, M. Lapuerta, C. Serrano. “Estimation of the laminar flame speed of producer gas from biomass gasification”. *Energy and Fuels*. Vol. 19. 2005. pp. 2172-2178.
 16. G. Schuster, G. Loffer, K. Weigl, H. Hofbauer. “Biomass steam gasification an extensive parametric modeling study”. *Bioresource Technology*. Vol. 77. 2001. pp. 71-79.
 17. M. Ruggiero, G. Manfrida. “An equilibrium model for biomass gasification processes”. *Renewable Energy*. Vol. 16. 1999. pp. 1106-1109.
 18. X. Li, J. R. Grace, A. P. Watkinson, C.J. Lim, A. Ergudenler. “Equilibrium modeling of gasification: A free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier”. *Fuel*. Vol. 80. 2001. pp. 195-207.
 19. A. Melgar, J. F. Pérez, B. Giménez, A. Horrillo. “Diagnóstico del proceso de gasificación de biomasa mediante el análisis de la composición del gas pobre”. *Anales del 8 Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Cusco (Perú). 2007. pp. 12-28.
 20. R. S. Spindt. “Air-fuel ratios from exhaust gas analysis”. *SAE Technical Paper, Ser.* 1965. Vol. 650507. 1965. pp. 788-793.
 21. Y. Majanne, P. Lautala, R. Lappalainen. “Condition monitoring and diagnosis in a solid fuel gasification process”. *Control Eng. Practice*. Vol. 3. 1995. pp. 1017-1021.
 22. Y. B. Yang, Y. Goh, R. Zakaira, V.Nasserzadeh, J. Swithenbank. “Mathematical modelling of msw incineration on a travelling bed”. *Waste Management*. Vol. 22. 2002. pp.369-380.
 23. Y. Yang, C. Ryu, A. Khor, V. Sharifi, J. Swithenbank. “Fuel size effect on pinewood combustion in a packed bed”. *Fuel*. Vol. 84. 2005. pp. 2026-2038.
 24. Y. Yang, V. Sharifi, J. Swithenbank. “Converting moving-grate incineration from combustion to gasification, numerical simulation of the burning characteristics”. *Waste Management*. Vol. 27. 2007. pp. 645-655.
 25. Y. B. Yang, N. V. Shafri, J. Swithenbank. “Substoichiometric conversion of biomass and solid wastes to energy in packed beds”. *AIChE Journal*. Vol. 52. 2006. pp. 809-817.
 26. D. Shin, S. Choi. “The combustion of simulated waste particles in a fixed bed”. *Combustion and Flame*. Vol. 121. 2000. pp. 167-180.
 27. Y. B. Yang, V. N. Sharifi, J. Swithenbank. “Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds”. *Fuel*. Vol. 83. 2004. pp. 1553-1562.
 28. Y. B. Yang, H. Yamauchi, V.Nasserzadeh, J. Swithenbank. “Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed”. *Fuel*. Vol. 82. 2003. pp. 2205-2221.

29. Y. B. Yang, C. Ryu, A. Khor, N. Yates, V. Sharifi, J. Swithenbank. "Effect of fuel properties on biomass combustion part ii. modelling approach identification of the controlling factors". *Fuel*. Vol. 84. 2005. pp. 2116-2130.
30. C. Di Blasi. "Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers". *Chemical Engineering Science*. Vol. 55. 2000. pp. 2931-2944.
31. M. L. Hobbs, P.T. Radulovic, L.D. Smoot. "Modeling fixed-bed coal gasifiers". *AIChE Journal*. Vol. 38. 1992. pp. 681-702.
32. M. L. Hobbs, P.T. Radulovic, L.D. Smoot. "Combustion and gasification of coals in fixed-beds". *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 19. 1993. pp. 505-586.
33. P. Radulovic, M. Ghani, LD. Smoot. "An improved model for fixed bed coal combustion and gasification". *Fuel*. Vol. 74. 1995. pp. 582-594.
34. A. Franco, N. Giannini. "Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants". *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 44. 2005. pp. 163-177.
35. S. Sadaka, A. Ghaly, M. Sabbah. "Two phase biomass air steam gasification model for fluidized bed reactors: Part i model development". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 22. 2002. pp. 439-462.
36. S. Sadaka, A. Ghaly, M. Sabbah. "Two phase biomass air steam gasification model for fluidized bed reactors: Part iii model validation". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 22. 2002. pp. 479-487.
37. S. Sadaka, A. E. Ghaly, M. A. Sabbah. "Two phase biomass air steam gasification model for fluidized bed reactors: Part ii model sensitivity". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 22. 2002. pp. 463-477.
38. I. Peterse, J. Werther. "Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed". *Chemical Engineering and Processing*. Vol. 44. 2005. pp. 717-736.
39. T. Jayah, L. Aye, R. Fuller, D. F. Stewart. "Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 25. 2003. pp. 459-469.
40. D. L. Giltrap, R. McKibbin, G. Barnes. "A steady state model of gas-char reactions in a downdraft biomass gasifier". *Solar Energy*. Vol. 74. 2003. pp. 85-91.
41. B. V. Babu, P. Sheth. "Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor". *Energy Conversion and Management*. Vol. 47. 2005. pp. 2602-2611.
42. A. Belghit, M. Dagueuet, A. Reddy. "Heat and mass transfer in a high temperature packed moving bed subject to an external radiative source". *Chemical Engineering Science*. Vol. 55. 2000. pp. 3967-3978.
43. W. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho. *Handbook of Heat Transfer*. Ed. McGraw – Hill. New York. 1998. pp. 235-245.
44. M. De Souza Santos. *Solid Fuels Combustion and Gasification, Modeling, simulation and equipment operation*. Ed. Marcel Dekker Inc. New York. 2004. pp. 24-38.
45. M. L. Hobbs, P. T. Radulovic, L. D. Smoot. "Chemical and physical processes in countercurrent fixed-bed gasification". *23rd Symposium of the Combustion Institute*. 1990. pp. 12-26.
46. A. P. De Wasch, G. F. Froment. "A two dimensional heterogeneous model for fixed bed catalytic reactors". *Chemical Engineering Science*. Vol. 26. 1971. pp. 629-634.
47. A. P. De Wasch, G. F. Froment. "Heat transfer in packed beds". *Chemical Engineering Science*. Vol. 27. 1972. pp. 567-576.
48. G. Froment, K. Bischoff. *Chemical Reactor Analysis and Design*. Ed. John Wiley and Sons. New York. 1979. pp. 78-83.
49. G. Froment, K. Bischoff. *Chemical Reactor Analysis and Design*. 2nd ed. Ed. John Wiley and Sons. New York. 1990. pp. 123-145.
50. M. U. Ghani, P.T. Radulovic, L.D. Smoot. "An improved model for fixed-bed coal combustion and gasification: Sensitivity analysis and applications". *Fuel*. Vol. 75. 1996. pp. 1213-1226.
51. K. M. Bryden, K. Ragland. "Numerical modeling of a deep, fixed bed combustor". *Energy & Fuels*. Vol. 10. 1996. pp. 269-275.
52. T. Kayal, M. Chakravarty, G. Biswas. "Mathematical modeling of steady state updraft gasification of jute stick particles of definite sizes packed randomly an analytical approach". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 60. 1997. pp. 131-141.
53. T. K. Kayal, M. Chakravarty. "Mathematical modelling of continuous updraft gasification of bundled jute-stick - a low ash content woody biomass". *Bioresource Technology*. Vol. 49. 1994. pp. 61-73.

54. J. Corella, J. Herguido, J. M. Toledo, J. I. Gómez. "Modelling fluidized bed gasifiers. part II: Gasification with steam in a bubbling fluidized bed". *1st World Conference on Biomass for Energy and Industry*. Sevilla (Spain) Vol. 2. 2000. pp. 83-97.
55. J. Corella, A. Sanz. "Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers, a pseudo-rigorous model for stationary state". *Fuel Processing Technology*. Vol 86. 2005. pp. 1021-1053.
56. C. Snaz, J. Corella. "Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers, results from a pseudo rigorous 1 dimensional model for stationary state". *Fuel Processing Technology*. Vol. 87. 2006. pp. 247-258.
57. S. Hamel, W. Krumm. "Mathematical modelling and simulation of bubbling fluidised bed gasifiers". *Powder Technology*. Vol. 120. 2001. pp. 105-112.
58. D. Oliva. *Combustión del Bagazo de Caña de Azúcar en Lecho Fluidizado*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid. 1999. pp. 110-121.
59. J. Arauzo, D. Radlein, J. Piskorz, D. S. Scott. "Catalytic Pyrogasification of Biomass. Evaluation of Modified Catalyst". *Ind. Eng. Chem*. Vol. 36. 1997. pp. 13-17.
60. M.P. Aznar, J. Corella, J. Delgado, J. Lahoz. "Improved Steam Gasification of Lignocellulosic Residues in a Fluidized Bed with Commercial Steam Reforming Catalyst". *Ind. Eng. Chem*. Vol. 32. 1993. pp. 7-14.
61. L. García, M. L. Salvador, J. Arauzo, R. Bilbao. "CO₂ as a gasifying agent for gas production from pine sawdust at low temperatures using Ni/Al coprecipitated catalyst". *Fuel Process Technology*. Vol. 69. 2001. pp. 76-89.
62. K. M. Bryden, K. Ragland, C. Rutland. "Modeling thermally thick pyrolysis of wood". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 22. 2002. pp. 41-53.
63. M. Hagge, K. M. Bryden. "Modeling the impact of shrinkage on the pyrolysis of dry biomass". *Chemical Engineering Science*. Vol. 57. 2002. pp. 2811-2823.
64. A. Zoulalian, N. Grioui, K. Halouani, F. Halouani. "Heat and mass transfer modelling during wood carbonization". *14th European Biomass Conference & Exhibition. Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*. Paris (France). 2005. pp. 23-32.
65. M. Lapuerta, J. Rodríguez, J. Hernández. "Kinetics of devolatilisation of forestry wastes from thermogravimetric analysis". *Biomass and Bioenergy*. Vol. 27. 2004. pp. 385-391.
66. M. Lapuerta, J. J. Hernández, J. Rodríguez. "Comparison between the kinetics of devolatilisation of forestry and agricultural wastes from the middle-south regions of Spain". *Biomass and Bioenergy*, Vol. 31. 2007. pp. 13-19.
67. D. Borge, J. F. Pérez, A. Melgar. "Kynetic study of the biomass devolatilization process in particles sizes between 2-19 mm by means of thermogravimetric analysis". *Dyna*. Vol. 75. 2008. pp. 123-131.
68. J. Porteiro, JL. Míguez, E. Granada, JC. Moran. "Mathematical modelling of the combustion of a single wood particle". *Fuel Processing Technology*. Vol. 87. 2006. pp. 169-175.
69. H. Thunman, F. Niklasson, F. Johnsson, B. Leckner. "Composition of volatile gases and thermo chemical properties of wood for modeling of fixed or fluidized beds". *Energy and Fuels*. Vol. 15. 2001. pp. 1488-1497.
70. C. Bruch, B. Peters, T. Nussbaumer. "Modelling wood combustion under fixed bed conditions". *Fuel*. Vol. 82. 2003. pp. 729-738.
71. M. F. Modest. *Radiative Heat Transfer*. Ed. Elsevier. Amsterdam. 2003. pp. 54-76.
72. A. D. Gosman, F. C. Lockwood. "Incorporation of a flux model for radiation into a finite-diference procedure for furnace calculations". *14th Intenational Symposium on Combustion*. The Combustion Institute. Pittsburgh. USA. 1972. pp. 786-817.
73. C. Argento, D. Bouvard. "A ray tracing method for evaluating the radiative heat transfer in porous media". *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 39. 1996. pp. 3175-3180.