

ANALISIS EXPERIMENTAL DEL SECADO DE ASERRIN EN LECHO DE CHORRO

R. M. MORENO

M. A. PAREDES

J. A. ASTUDILLO

Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos. Facultad de Ciencias de la Ingeniería.
Universidad Austral de Chile. Casilla 567. Valdivia. CHILE

RESUMEN

La actividad forestal en Chile ha producido en las últimas dos décadas una importante cantidad de desechos derivados de la explotación y elaboración de la madera, tales como aserrín, chips, astillas y descortezados.

Este trabajo pretende dar a conocer los resultados obtenidos en un estudio experimental sobre el secado de aserrín en un lecho de chorro.

Se diseñó y construyó un equipo experimental de laboratorio para analizar la hidrodinámica y la transferencia de calor y materia del proceso.

Se ensayó el equipo con aserrín de $2,78 \times 10^{-3}$ m de tamaño promedio de partícula y humedades entre 117 y 147 p. 100, base seca y se obtuvieron los parámetros de operación de la unidad: altura de lecho, velocidad del aire, caída de presión del lecho y tiempos de secado. Adicionalmente, se determinó el nivel de producción, consumo de energía y rendimiento térmico del proceso.

PALABRAS CLAVE: Aserrín
Secado
Reciclaje
Lecho de chorro
Transferencia de calor
Transferencia de masa

INTRODUCCION

La creciente actividad del sector forestal en la zona sur de Chile ha ido generando una gran acumulación de desechos forestales; particularmente, el aserrín es un desecho que ha despertado interés debido a los altos volúmenes que han ido cubriendo suelos a velocidades cada vez más elevadas.

En 1988, el consumo nacional de madera fue de 950.000 m³ entre aserraderos e industrias de terciados y chapas (Estévez, 1991). De acuerdo a estos antecedentes y en base al porcentaje promedio de madera que es transformada en aserrín en los procesos mencionados, se estima que ese año ya se generaban alrededor de 100.000 m³ de aserrín. En 1991 y considerando sólo la producción de madera aserrada y chapas de la X Región del país, se generaban más de 105.000 m³ de aserrín en esa zona.

Recibido: 10-10-93

Aceptado para su publicación: 10-1-94

Una de las alternativas que se perfilan como técnica y económicamente viables para dar un uso racional al aserrín, es la combustión con el fin de generar energía. Sin embargo, debido a los altos contenidos de humedad que posee el desecho, la utilización de él como combustible es poco eficiente y requiere de grandes volúmenes de cámara de combustión si se emplea un sistema convencional de quemado. Una alternativa atractiva para enfrentar este problema sería la combustión en lecho fluidizado. Otra posibilidad consiste en secar el desecho para quemarlo posteriormente en forma más eficiente en un combustor convencional o bien fabricar briquetas de aserrín, proceso que requiere de bajos contenidos de humedad de las partículas.

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar el comportamiento hidrodinámico y térmico de un equipo de secado de aserrín en un lecho de chorro. Se pretende determinar velocidades de operación de la unidad, caídas de presión máxima y mínima del lecho de partículas, influencia de la altura del lecho en el comportamiento del equipo y las curvas de secado. También se pretende evaluar el desempeño del equipo desde el punto de vista de la producción y el consumo de energía. Estos resultados permitirán tener una base más confiable para el dimensionamiento de una unidad de secado a escala mayor. El trabajo es una prolongación de estudios anteriores relacionados con la fluidización de aserrín y desechos forestales (Moreno, 1991; Moreno *et al.*, 1993).

Fundamentos de un lecho de chorro

La técnica de lecho de chorro es una variante de la fluidización, la cual permite un contacto íntimo entre un gas y sólidos particulados, a través de una agitación de las partículas producida por una corriente ascendente del gas. La Figura 1 muestra un esquema de funcionamiento de un lecho de chorro de sección circular. En él, se aprecia el gas entrando por un pequeño orificio ubicado en la base de la sección cónica de la columna. El flujo ascendente del gas impacta a los sólidos obligándolos a elevarse por el centro de la columna (chorro), para luego descender por gravedad en forma más compacta por la zona anular hasta alcanzar nuevamente la base cónica. Se produce así, un movimiento cíclico de las partículas en el interior de la columna.

La idea del lecho de chorro se viene desarrollando desde mediados de la década del 50 (Mathur *et al.*, 1955) y ha sido empleada especialmente para contactar gases con sólidos granulados de constitución irregular y de un tamaño de partícula superior a los empleados en la técnica de la fluidización, o sea, superior a 1×10^{-3} m (Mathur, 1974).

En las últimas décadas, el secado de productos agrícolas e industriales en lecho de chorro ha recibido una gran atención en aplicaciones tales como el trigo, arroz, levaduras, etc. (Pham, 1983; Freire *et al.*, 1991; Cremasco *et al.*, 1991). En estas aplicaciones, el gas debe ser introducido con una temperatura superior a la de los sólidos para posibilitar el intercambio de calor convectivo y la evaporación del agua.

El diseño de unidades de lecho de chorro requiere del conocimiento de parámetros hidrodinámicos tales como la velocidad de chorreo y las pérdidas de presión en el lecho, los cuales permiten determinar las condiciones de operación del equipo y las características del soplador de aire. Estos parámetros son obtenidos normalmente en forma experimental a través de la construcción de un gráfico de

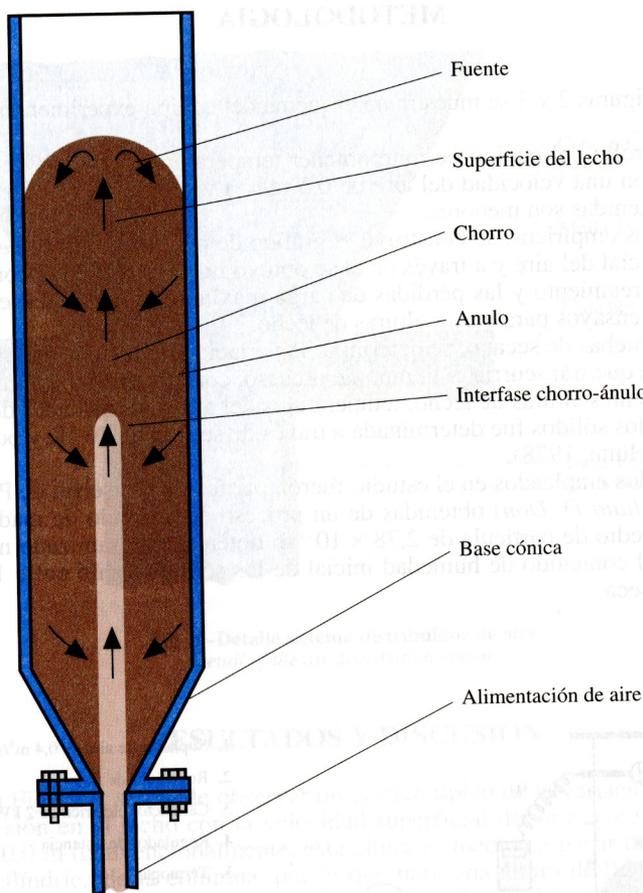


Fig. 1.-Esquema de funcionamiento de un lecho de chorro
Operational diagram of a spouted bed

pérdida de presión del lecho *versus* velocidad superficial del gas. Este gráfico, que debe ser obtenido tanto para flujo de gas ascendente como descendente, permite además mostrar la transición de lecho fijo a lecho de chorro.

Desde el punto de vista térmico, el diseño de un secador requiere del conocimiento de las tasas y tiempos de secado, variables que también son obtenidas empíricamente para una mayor fiabilidad del diseño.

El empleo de correlaciones recogidas en la literatura especializada para predecir variables de diseño, no siempre es fiable debido a que ellas han sido obtenidas en condiciones de operación y con materiales específicos y diferentes, en este caso, al aserrín. Además, dichas correlaciones contienen parámetros de muy difícil evaluación como la porosidad del lecho, el ángulo de fricción de las partículas y su esfericidad.

METODOLOGIA

En las Figuras 2 y 3 se muestra un esquema del equipo experimental empleado en el estudio.

El desarrollo del equipo permite obtener temperaturas máximas de operación de 403 °K con una velocidad del aire de 0,3 m/s; a velocidades mayores, las temperaturas obtenidas son menores.

Con datos empíricos, se construyó el gráfico de pérdida de carga *versus* velocidad superficial del aire y a través de él se obtuvo la velocidad en la condición de mínimo chorreamiento y las pérdidas de carga máxima y mínima del lecho, efectuándose los ensayos para varias alturas de lecho.

En las pruebas de secado, se determinó la variación de la humedad de los sólidos a medida que transcurría el tiempo de proceso, construyéndose curvas de secado para diferentes alturas de lecho, temperaturas del aire y velocidades del aire. La humedad de los sólidos fue determinada a través de secado a 376 °K y por diferencia de peso (Hütte, 1978).

Los sólidos empleados en el estudio fueron partículas de aserrín de Pino Insigne (*Pinus radiata D. Don*) obtenidas de un proceso de aserrado de madera y con un tamaño medio de partícula de $2,78 \times 10^{-3}$ m obtenido por tamizado normalizado ASTM. El contenido de humedad inicial de los sólidos osciló entre 117 y 147 p. 100, base seca.

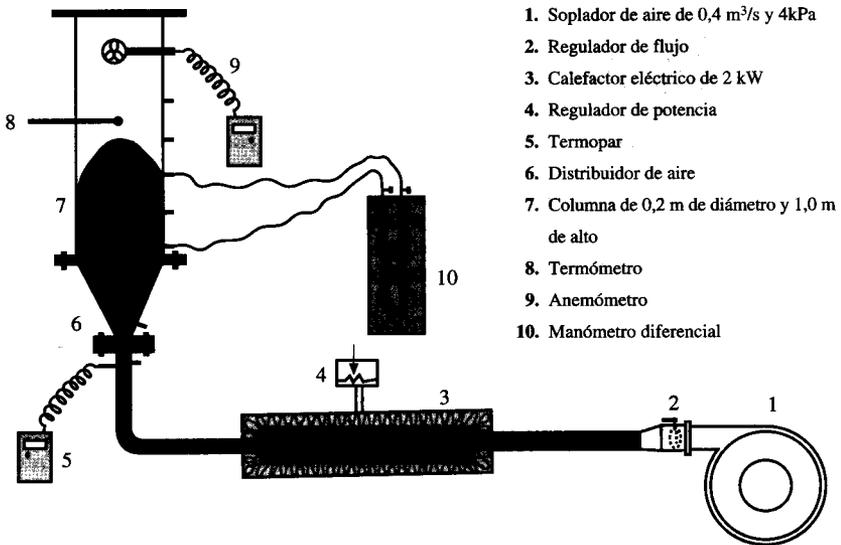


Fig. 2.—Esquema equipo experimental empleado en el estudio
 Diagram of the Experimental Equipment used in this study

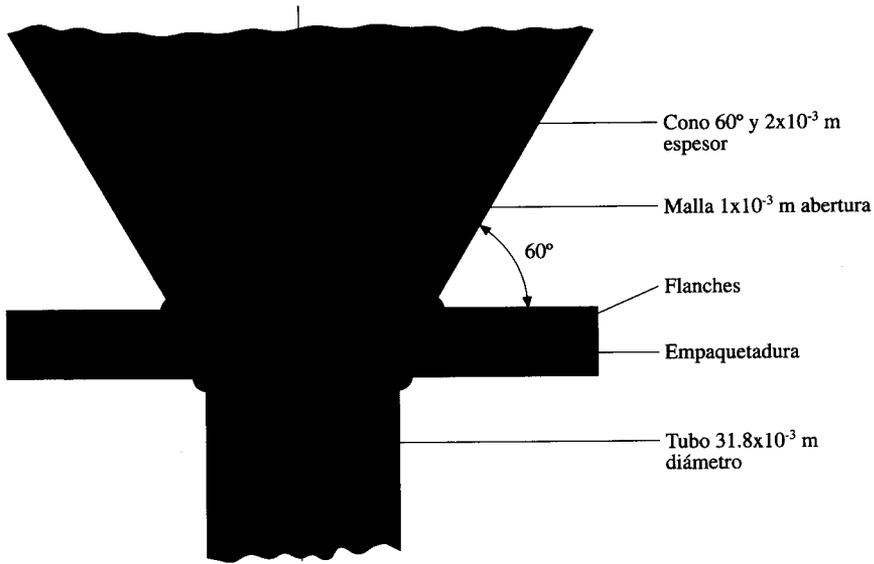


Fig. 3.—Detalle sistema distribuidor de aire
Detail of the air distribution system

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 4, se puede observar un gráfico típico de la variación de la pérdida de presión en el lecho con la velocidad superficial del aire, para una altura de lecho de 0,0 m (convencionalmente, esta altura es medida a partir de la base de la sección cilíndrica de la columna, por lo que para una altura de 0,0 m, la sección cónica se encuentra cargada de partículas sólidas). Se pueden apreciar en este gráfico los puntos correspondientes a la velocidad en la condición de mínimo chorreamiento, V_{ms} y las pérdidas de carga máxima y mínima, Δp_M y Δp_m , respectivamente. Construyendo este gráfico para varias alturas de lecho H_c , se pudo obtener la influencia de esta variable en los parámetros hidrodinámicos, efecto que se muestra en la Figura 5. La tendencia de estos resultados es bastante concordante con lo esperado, de acuerdo a los fundamentos teóricos del fenómeno.

Se pudo establecer que la altura de lecho que permite un chorro estable, oscila entre 0,05 y 0,20 m. Alturas inferiores a 0,05 m producen fuertes aglomeraciones de sólidos al comienzo del proceso producto de la gran humedad superficial de las partículas que origina fuerzas de cohesión entre ellas. Además, se produce adherencia de sólidos a las paredes de la columna lo que evita un deslizamiento de ellos por la superficie cónica hacia el distribuidor de aire. Por otro lado, alturas superiores a 0,20 m produjeron flujos tipo pistón y canalización del flujo de aire a través de pasajes preferenciales en el lecho, efecto también debido a la humedad de los sólidos.

Los resultados de transferencia de calor y materia, se muestran en las Figuras 6, 7 y 8, teniendo como parámetro a la altura de lecho H_c , la temperatura del aire T y la velocidad del aire V , respectivamente.

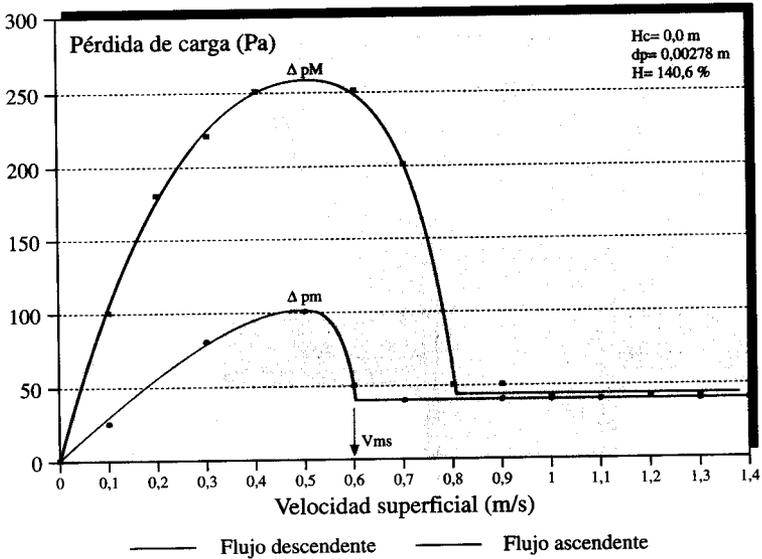


Fig. 4.—Pérdida de carga del lecho en función de la velocidad superficial del aire
Bed loss of charge and air superficial speed functions

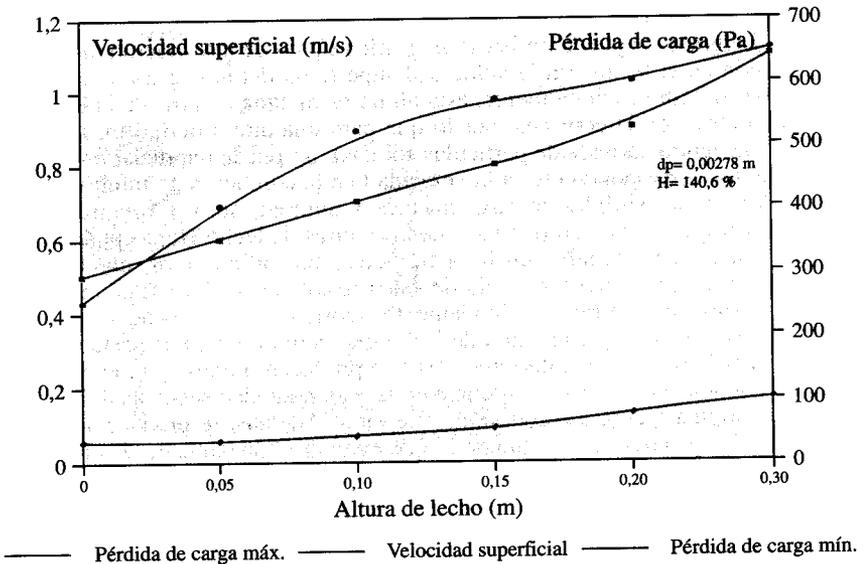


Fig. 5.—Influencia de la altura del lecho en el comportamiento hidrodinámico de él
Influence of bed height on bed hydrodynamic behaviour

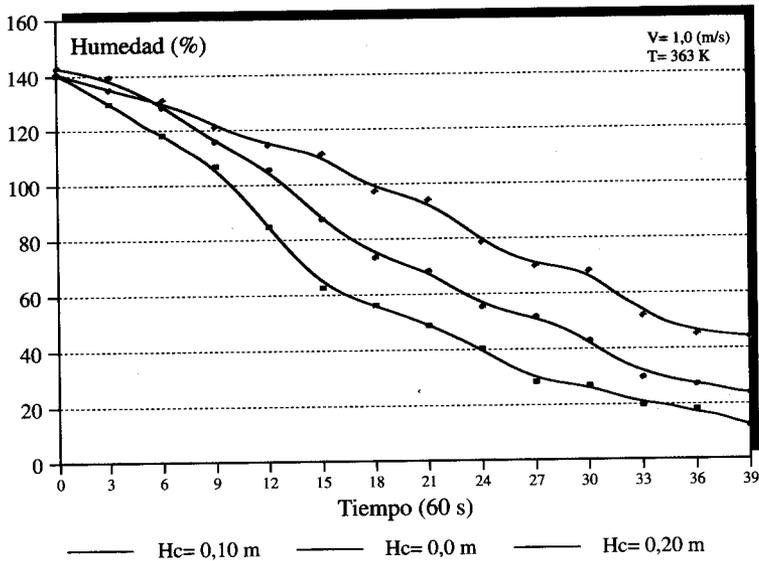


Fig. 6.-Curvas de secado para diferentes alturas de lecho
Drying curves for different bed heights

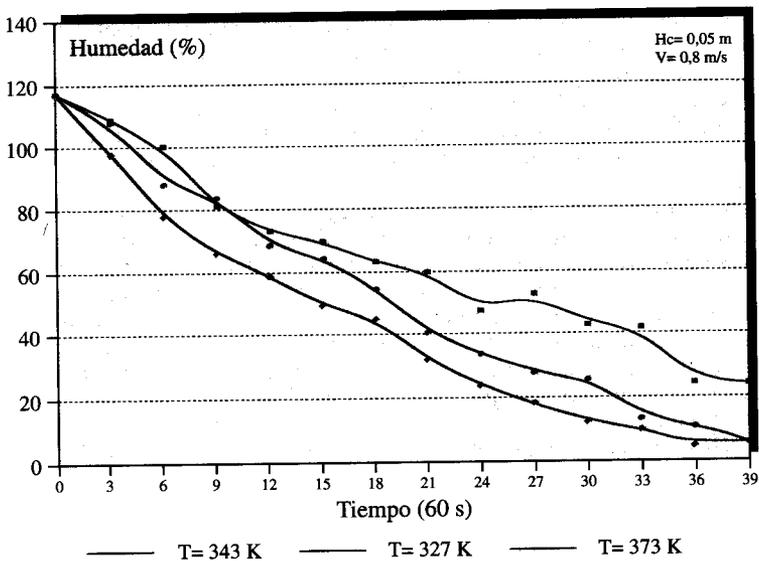


Fig. 7.-Curvas de secado para diferentes temperaturas del aire
Drying curves for different air temperatures

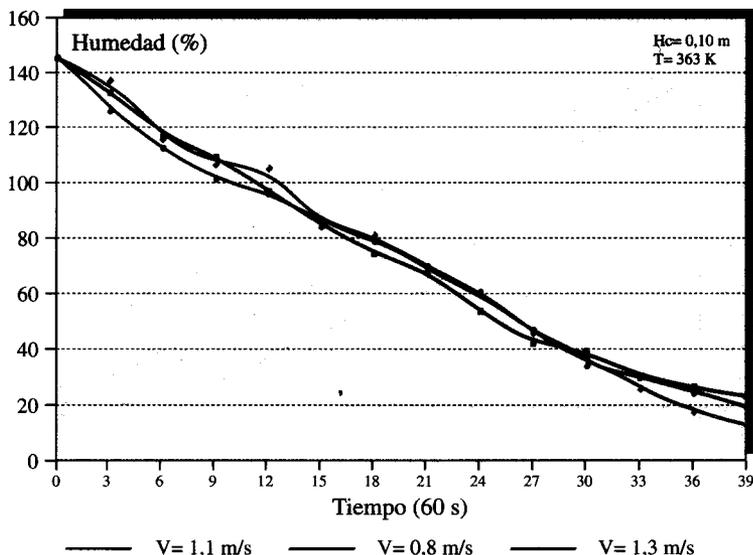


Fig. 8.—Curvas de secado para diferentes velocidades del aire
Drying curves for different air velocity values

Se aprecia un efecto importante de la temperatura de operación en la velocidad de secado, especialmente en el período de tasa de secado decreciente.

La velocidad de operación no fue un parámetro relevante dentro del rango en que este se pudo variar: $V = (1,0 - 1,85)V_{ms}$. Por tanto, no hubo disminuciones significativas del tiempo de secado al emplear velocidades más altas. Velocidades del aire superiores a $1,85 V_{ms}$, producen un arrastre de partículas finas fuera del equipo a medida que el proceso de secado avanza en el tiempo y además conducen a mayores consumos de energía y bajos rendimientos térmicos, según se verá más adelante.

En base a las curvas de secado se determinaron los tiempos de secado, tasas de producción y de evaporación, consumos de energía y rendimientos térmicos, obtenidos bajo diferentes condiciones de operación del equipo y se reflejan en las Tablas 1, 2 y 3. Estas Tablas sirven para comparar el efecto de la altura de lecho, temperatura del aire y velocidad del aire en el funcionamiento general del equipo. Dicho funcionamiento puede verse alterado aún más, si la humedad final del proceso es variable, tal como lo muestra la Tabla 4. Esto se debe a la notable disminución de las tasas de secado que experimenta el proceso en la extracción de la humedad final de los sólidos.

De estos resultados se puede concluir que para la geometría del lecho empleada en el presente estudio, las mejores condiciones para el secado serían una altura de lecho de $0,20 \text{ m}$ y velocidades cercanas a las de mínimo chorreo. Velocidades más elevadas, además de producir arrastre de sólidos fuera del lecho, conducen a altos consumos de energía calórica y a bajos rendimientos térmicos. Así lo demuestra la comparación de los resultados de las tres primeras columnas de la Tabla 1, donde el empleo de una velocidad de $1,0 \text{ m/s}$ (muy cercana a la velocidad

TABLA 1
INFLUENCIA DE LA ALTURA DEL LECHO
EN EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO
Influence of bed height on the equipment performance

Variable	Altura del lecho (m)		
	0,00	0,10	0,20
Tiempo de secado en (s)	1.500	1.800	2.400
Producción de aserrín seco en 10^{-3} (kg/s m ²)	7,5	16,9	20,8
Evaporación de agua en 10^{-3} (kg _v /s m ²)	8,9	19,7	24,4
Consumo específico de energía en (kJ/kg _v)	9.953	4.485	3.620
Rendimiento térmico (%)	24	55	67

Humedad inicial = 142 p. 100; humedad final = 40 p. 100; velocidad del aire = 1,0 m/s; temperatura del aire = 363 K

Initial moisture = 142 p. 100; Final moisture = 40 p. 100, Air velocity = 1.0 m/s; Air temperature = 363 °K

TABLA 2
INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE
EN EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO
Influence of air temperature on the equipment performance

Variable	Temperatura del aire (K)		
	337	343	373
Tiempo de secado en (s)	2.340	1.740	1.440
Producción de aserrín seco en 10^{-3} (kg/s m ²)	8,9	11,9	14,4
Evaporación de agua en 10^{-3} (kg _v /s m ²)	8,1	11,1	13,3
Consumo específico de energía en (kJ/kg _v)	4.456	4.623	6.036
Rendimiento térmico (%)	54	52	40

Humedad inicial = 117 p. 100; humedad final = 25 p. 100; velocidad del aire = 0,8 m/s; altura del lecho = 0,05 m

Initial moisture = 117 p. 100; Final moisture = 25 p. 100, Air velocity = 0.8 m/s; Bed height = 0.05 m

de mínimo chorreo correspondiente a una altura de 0,20 m), produjo rendimientos del orden de 67 p. 100 y la mejor tasa de producción y secado.

Por otro lado, el empleo de temperaturas altas produce buenos efectos en la tasa de secado aumentando la producción del equipo; sin embargo, el uso de temperaturas elevadas debe ir acompañado de alturas de lecho también elevadas con el fin de aprovechar mejor la energía calórica. En caso contrario, se obtienen bajos rendimientos ya que el aire sale del equipo con energía que aún podría ser empleada en secado. El equipo no permitió trabajar con temperaturas superiores a 373 K y con una altura superior a 0,20 m, pero se espera que el desempeño de una unidad

TABLA 3
INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL AIRE
EN EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO
Influence of the air velocity on the equipment performance

Variable	Velocidad del aire (m/s)		
	0,8	1,1	1,3
Tiempo de secado en (s)	2.340	2.160	2.070
Producción de aserrín seco en 10^{-3} (kg/s m ²)	13,1	13,9	14,7
Evaporación de agua en 10^{-3} (kg _v /s m ²)	15,8	16,9	18,1
Consumo específico de energía en (kJ/kg _v)	4.468	6.111	6.370
Rendimiento térmico (%)	54	40	38

Humedad inicial = 147 p. 100; humedad final = 25 p. 100; temperatura del aire = 363 K; altura del lecho = 0,10 m

Initial moisture = 147 p. 100; Final moisture = 25 p. 100, Air temperature = 363 °K; Bed height = 0.10 m

TABLA 4
INFLUENCIA DE LA HUMEDAD FINAL DEL ASERRIN
EN EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO
Influence of final sawdust moisture on the equipment performance

Variable	Humedad final (%)			
	10	20	30	40
Tiempo de secado en (s)	2.340	1.920	1.620	1.380
Producción de aserrín seco en 10^{-3} (kg/s m ²)	8,8	10,8	12,8	15,0
Evaporación de agua en 10^{-3} (kg _v /s m ²)	9,4	10,5	11,1	11,6
Consumo específico de energía en (kJ/kg _v)	5.468	4.895	4.630	4.431
Rendimiento térmico (%)	44	50	52	55

Humedad inicial = 117 p. 100; velocidad del aire = 0,8 m/s; temperatura del aire = 343 K; altura del lecho = 0,05 m

Initial moisture = 117 p. 100; Air velocity = 0.8 m/s; Air temperature = 343 °K; Bed height = 0.05 m

a mayor escala puede verse mejorado notablemente, con mayores cargas de producto y mayores temperaturas del aire.

CONCLUSIONES

Se evaluó experimentalmente el funcionamiento de un equipo de secado de aserrín en un lecho de chorro, determinándose los parámetros hidrodinámicos y térmicos más relevantes del proceso.

Se determinaron la velocidad mínima de chorreo y las pérdidas de presión máxima y mínima de un lecho de aserrín cuyo contenido de humedad osciló entre 117 y 147 p. 100 y con un tamaño de partícula promedio de $2,78 \times 10^{-3}$ m. Se estudió la influencia que ejerce la altura del lecho en los parámetros señalados. La velocidad osciló entre 0,5 y 1,1 m/s para alturas de lecho que fluctuaron entre 0,0 y 0,30 m. Las pérdidas de presión mínima y máxima para el lecho de 0,30 m fueron de 0,1 y 0,65 kPa, respectivamente.

Del análisis térmico de la unidad se pudo concluir que las mejores condiciones de operación fueron 0,20 m de altura de lecho, 363 K de temperatura del aire y 1,0 m/s de velocidad superficial del aire, consiguiéndose un rendimiento térmico del 67 p. 100 si los sólidos eran secados desde 147 p. 100 hasta 40 p. 100. Al secarlos hasta humedades del 20 p. 100, el rendimiento térmico desciende hasta cerca del 50 p. 100, por lo que será importante al diseñar una unidad mayor, determinar previamente la humedad final deseada en el proceso. Esto obviamente depende del objetivo para el cual se efectúa el secado. Se debe tener presente que pequeñas variaciones en la humedad final producen alteraciones importantes en el funcionamiento del equipo.

Bajo las mejores condiciones de operación, la producción del equipo fue de $20,8 \times 10^{-3}$ kg/s de aserrín seco por metro cuadrado de sección del lecho, con una tasa de evaporación de $24,4 \times 10^{-3}$ kg/s de agua por metro cuadrado de lecho y un consumo energético de 3.620 kJ/kg de agua evaporada.

Se estima que una unidad a mayor escala puede trabajar con mayores secciones de lecho posibilitando el empleo de cargas de producto en el equipo mayores y altas temperaturas de aire. Se lograría así, una mayor producción horaria y un rendimiento térmico superior en el aprovechamiento de la energía requerida por el proceso.

Debido a las bajas temperaturas de operación requeridas en el proceso de secado, sería interesante analizar la posibilidad de emplear gases de combustión residuales y provenientes de alguna caldera con el fin de aumentar la rentabilidad del proceso de secado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo desean dejar constancia de su reconocimiento a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile por el apoyo financiero brindado al proyecto S-92-14.

SUMMARY

Experimental analysis of drying of sawdust in a spouted bed

Forest activity in Chile has brought about an important amount of waste from the exploitation and elaboration of wood, such as sawdust, chips, and barked splinters.

This work aims at showing the results obtained through an analysis of drying of sawdust in a spouted bed.

An experimental laboratory equipment was designed and built to analyse hydrodynamics, and heat and mass transfer process.

The equipment was tested with sawdust of 2.78×10^{-3} m particle average size and moisture between 117 and 147 p. 100, dry base and the operating parameters of the unit were obtained: height of the

bed, air velocity, pressure drop of the bed, and time of drying. In addition, level of production, energy consumption, and heat performance of the process were determined.

KEY WORDS: Sawdust
Drying
Recycling
Spouted bed
Heat transfer

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CREMASCO M. A., ROCHA S. C., MASSARANI G., 1991. Drying of corn and rice in conical spouted beds: part II. IV Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, La Serena, 2: 313-316.
- ESTEVEZ G., 1991. La industria forestal en la X Región. VII Reunión sobre Investigación y Desarrollo de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- FREIRE J. T., MORRIS J. A., 1991. Drying of yeast paste in a spouted bed dryer. IV Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, La Serena, 2: 309-312.
- HÜTTE 1978. Manual del Ingeniero de Taller. Ed. Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1: 448 pp.
- MATHUR K. B., GISHLER P. E., 1955. *AIChE Journal*, 1: 157-164.
- MATHUR K. B., EPSTEIN N., 1974. Spouted beds, Ed. Academic Press, 116 pp.
- MORENO R., 1991. Secado de aserrín en lecho fluidizado. *Ciencia e Investigación Forestal*, 5 (2): 217-227.
- MORENO R., PAREDES M., AMESTICA A., BAEZA D., 1993. Comportamiento hidrodinámico de la fluidización de desechos forestales. *Ciencia e Investigación Forestal*.
- PHAM Q. T., 1983. Behaviour of a conical spouted bed dryer for animal blood. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61: 426-434.