

# EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VELOCIDADES MÍNIMAS DE FLUIDIZACIÓN PARA MEZCLAS DE CARBÓN RIPIO Y RESIDUOS AGRÍCOLAS COLOMBIANOS

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITIES FOR MIXTURES OF COLOMBIAN RESIDUAL COAL AND AGRICULTURAL WASTES

CARLOS GÓMEZ

*MSc., Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, cagomez0@unal.edu.co*

ELIANA LOPERA

*Dra., MSc. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, eclopera@unal.edu.co*

Recibido para revisar Junio 25 de 2010, aceptado Diciembre 21 de 2010, versión final Diciembre 23 de 2010

**RESUMEN:** Un estudio sistemático experimental se lleva a cabo para determinar las propiedades fluido-dinámicas como la distribución del tamaño de partícula, la densidad de bulbo, la velocidad de fluidización, etc. para mezclas de carbón ripio, residuo de las minas de Colombia, y residuos agrícolas como la cascarilla de arroz, aserrín y cisco de café. A partir de los resultados se recomendaron las mezclas que mejores condiciones fluido dinámicas presentaron en frío para su posterior evaluación en el proceso de co-gasificación.

**PALABRAS CLAVE:** Lecho fluidizado, mezclas carbón-biomasa, velocidades mínimas de fluidización.

**ABSTRACT:** A systematic experimental study is conducted to determine fluid dynamic properties such as the particle size distribution, bulk density, fluidizing velocity, etc., of mixtures of residual coal, a waste from the mining activity in Colombia, and agricultural wastes like rice husks, sawdust and coffee shells. From the results obtained in this study, optimal mixtures showing the best cold fluid dynamics were recommended, for further evaluation in co-gasification process.

**KEYWORDS:** Fluidized bed, coal-biomass mixtures, minimum fluidization velocity.

### 1. INTRODUCCIÓN

Colombia tiene las mayores reservas de carbón de América Latina. Posee el 0.7% de las reservas mundiales de carbón (7.000 millones de toneladas métricas), representa el 0.75% del total de la producción mundial (con 49,3 millones de toneladas anuales), y consume sólo el 0.096% del total producido mundial (5.2 millones de toneladas), genera en el proceso extractivo un alto porcentaje de carbón fino o ripio, que por su baja granulometría y alto contenido de cenizas, presenta menor demanda que los tamaños

mayores denominados genéricamente granulados. La industria Colombiana en gran parte utiliza reactores a carbón con quemadores de parrilla, cuyos orificios son de mayor tamaño que el promedio granulométrico

del carbón ripio, resultando en un alto desperdicio de combustible no quemado que se mezcla en el fondo del reactor con las cenizas.

En el 2002 de acuerdo a Agrocadenas, se produjeron en Colombia 2'313.811 toneladas métricas (Tm) de arroz paddy (arroz con cáscara verde) y aproximadamente 1'504.000 Tm de arroz blanco. En el mismo año, en Colombia se produjeron alrededor de 660.000 toneladas de café beneficiado, las cuales generaron aproximadamente 140.000 toneladas de cáscara de café. Mientras en la explotación maderera cerca del 33% de la madera cortada para fines industriales constituye residuos forestales.

La biomasa es un tipo de materia orgánica renovable con un período de formación relativamente bajo, de gran potencial de generación y con expectativas de

largo plazo dentro de la bioenergética que, según la Agencia Internacional de Energía, suministrará alrededor de 20% de la energía del mundo para el año 2020 y con el uso de los diferentes tipos de materiales, será económico, tecnológico y ambiental aceptable para sustituir a los combustibles fósiles [1].

La fluidización se ha convertido en una técnica utilizada habitualmente en los procesos que requieren trabajar con materiales sólidos granulados de diversos tamaños y naturaleza principalmente de las características del lecho fluidizado, la mezcla da como resultado la segregación, en el caso de las partículas heterogéneas debido al peso o la densidad, la tendencia a la segregación es muy sensible a las diferencias de densidad, especialmente a bajas velocidades de gas, la calidad de la mezcla de materiales heterogéneos en un lecho fluidizado está influenciado en mayor medida por la relación de las densidades de las partículas que por la relación de sus diámetros [2].

Los lechos fluidizados se encuentran entre los sistemas de reactores más importantes de la industria química, tanto por la excelente capacidad de mezcla y de alta temperatura y las tasas de transferencia de masa [3]. Una característica atractiva de la tecnología de fluidización es el de satisfaciendo las operaciones basadas en el contacto entre una corriente de gas y una carga sólida, como en el caso de la combustión y/o la gasificación del carbón o la biomasa (1, 1, 2) [4].

A pesar de las ventajas que tienen los lechos fluidizados gas-sólido, existen limitaciones inherentes al tipo de sólido a utilizar como lo es la canalización, burbujas y flujo tapón, que reducen la tasa de transferencia, lo que afecta la salida del sistema e influyen en la calidad de fluidización [5], y para el caso particular de la biomasa estos fenómenos toman relevancia dado que no puede ser fácilmente fluidizado, debido a sus formas peculiares tamaños y densidades [6], es por ello que se han clasificado en cuatro grupos de la A hasta la D por Geldart [7], de la cual el tipo B es el que más ampliamente ha sido estudiado en las últimas décadas [8], de allí la importancia de estudiar las características de la fluidización de los materiales en las mezclas de biomasa con carbón, para mejorar las propiedades fluido dinámicas y para el modelado y el diseño de los reactores.

Las mezclas de partículas favorecen fenómeno de la segregación lo cual es ocasionado por las diferencias

de densidad y tamaño de partículas [9], en la actualidad éstos son de considerable importancia, las partículas de biomasa son comúnmente de tamaños no estándar en formas diversas (por ejemplo largas, delgadas, fibrosas, tallos), estas diferencias son a menudo críticas para su manejo, por estas características de flujo multifásico las hacen de especial interés [10], que con frecuencia son responsables del correcto funcionamiento del reactor.

El propósito de este trabajo reside en la determinación de un parámetro fluidodinámico como lo es la velocidad mínima de fluidización de las mezclas de biomasa (cascarilla de arroz, cascarilla de café, aserrín) y los residuos de carbón, en un fluidizador para posteriormente ser llevados a través de un proceso de co-gasificación en un reactor de lecho fluidizado, para aprovecharse como una fuente alternativa y renovable de energía. Esta es una tecnología limpia, La tecnología de lecho fluidizado es una combustión altamente eficiente alrededor de 96% al 98% [11], y La tecnología de gasificación de la biomasa es un área que tiene una aplicación viable y se ha desarrollado activamente para aplicaciones industriales [12] ya que la combustión de la biomasa no contribuye a la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, ya que es parte de su ciclo natural.

## 2. MATERIALES, EQUIPO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Equipo Experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en una columna de acrílico formado por tres módulos rectos de 0,5 m. cada una y con 0,82 m. de diámetro interior, unidos entre sí por bridas, y un cuarto, en forma de cono, el módulo de abajo, conocida como la cámara abierta, que el distribuidor se adhiere a ella (ver Figura 1)

La columna está equipada con un tablero de indicadores de presión (A, B, C, D y E), que permiten al operador saber las pérdidas de carga entre diferentes puntos del equipo. Manómetro A es de mercurio y las medidas de la entrada de la columna de presión de aire, manómetros B, C, D y E son medidores de agua, y miden, en el siguiente orden, la pérdida de presión en el distribuidor, en la columna, en la centrífuga para la captura de partículas en el aire muy fino, y en la placa de orificios utilizado principalmente para la calibración del rotámetro.

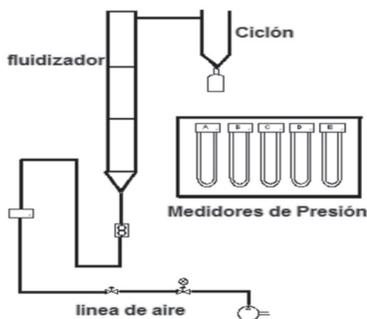


Figura 1. Diagrama de esquema experimental

Para el aire de fluidización se mantiene a 130,96 kPa (19 psig), medido con un calibrador de presión en la parte superior de la válvula de purga de aire del compresor para el sistema de fluidificación. La segunda válvula se utiliza para dosificar el flujo de aire en la columna. El flujo de aire se mide con rotámetro con una capacidad máxima de medida de 2,55 x 103 m3 / s. Además, con el fin de amortiguar las lecturas del manómetro, dos tanques de alivio de presión están disponibles. El equipo experimental se presenta en la Figura 2.

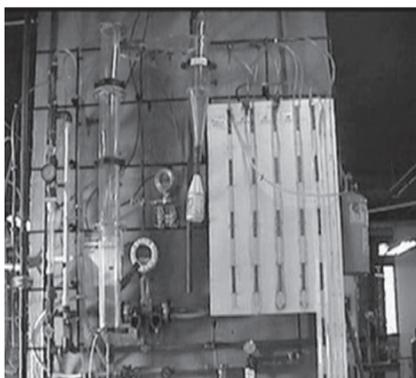


Figura 2. Equipo Experimental

Los experimentos llevados a cabo para determinar la velocidad de fluidización mínima de los restos de carbón, la biomasa y sus mezclas se describen a continuación

### 2.1.1 Materiales

Los productos del carbón ripio: Estos experimentos se llevaron a cabo con carbón ripio de la zona de Amagá (Antioquia). Se utilizó la siguiente granulometría:

- Carbón Malla -10 +16 (2 mm. – 1.16 mm.)
- Carbón Malla -16 +18 (1.16 mm. – 1 mm.)
- Carbón Malla -18 +30 (1 mm. – 0.6 mm.)
- Carbón Malla -30 (< 0.6 mm.)

La densidad del material se midió mediante el uso de un picnómetro, donde el líquido utilizado fue agua, y se realizó una estimación de la densidad aparente para obtener la altura inicial de del lecho entre 0,12 y 0,17 m.

Biomasa: Las biomazas utilizadas fueron la cascarilla de arroz, cisco de café y aserrín de roble de tierra caliente. Inicialmente, se intentó la fluidización de cada uno de estos materiales con el fin de determinar su velocidad mínima de fluidización y definir un tamaño de partícula de carbón, con una velocidad mínima de fluidización similar y llevar a cabo las mezclas de biomasa con carbón. No obstante, debido principalmente a la forma, el tamaño y la densidad de partículas de la biomasa de la prueba, la cascarilla de arroz, el cisco de café y aserrín no se pudo ser fluidizado por separado por la formación de canales donde el aire pasa a través de los sólidos, mientras que permanecen en un lecho estático.

Mezclas de carbón que la biomasa: Los ensayos se realizaron con una malla de carbón -18 +30, ya que el carbón es el que presenta mejor fluidización de los tamaños de las partículas antes mencionadas y con cada tipo de biomasa. Proporciones diferentes, como porcentaje del volumen de carbón de la biomasa se utiliza, con el fin de determinar cuál ofrece mejores condiciones de fluidización. Las mezclas utilizadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Mezclas carbón-biomasa

Mezcla	Proporción (% vol)	Proporción (% w)
Carbón-cascarilla de arroz	50-50	83.33 - 16.67
	75-25	93.70 - 6.30
	80-20	94.22 - 5.78
	85-15	95.14 - 4.86
	90-10	97.99 - 2.01
Carbón-Cisco de café	50-50	81.45 - 18.55
	75-25	86.16 - 13.84
	80-20	88.91 - 11.09
	85-15	93.61 - 6.39
	90-10	95.19 - 4.81

Mezcla	Proporción (% vol)	Proporción (% w)
Carbón aserrín	50-50	92.91 - 7.09
	75-25	95.33 - 4.67
	80-20	96.74 - 3.26
	85-15	97.83 - 2.17
	90-10	98.50 - 1.50

Cálculo experimental de la velocidad mínima de fluidización.

Para calcular la velocidad superficial del aire (VSA) se debe corregir el flujo de aire medido con el rotámetro, ya que está calibrado para condiciones T1 = 25 ° C y P1 = 101.325 kPa (1 atm), ligeramente diferente de las condiciones de trabajo T2 de 26 ° C y P2 = 130,96 kPa (1,29 atm). La siguiente ecuación se utiliza para corregir el flujo de aire, que se obtiene después de algunas manipulaciones matemáticas [4]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \tag{1}$$

T1 y P1 y 2 es la densidad del aire en P2 y T2, y P2 es la presión absoluta del aire a través del rotámetro. La superficie de la velocidad del aire Vsa se calcula sobre la base de:

$\rho_1$  es la densidad del aire en la T1 y P1 y  $\rho_2$  es la densidad del aire a P2 y T2; P2 es la presión absoluta a través del rotámetro. La velocidad superficial del aire es calculada con base en:

$$V_{sa} = \frac{Q}{A} \tag{2}$$

Q es el flujo volumétrico necesario para suspender las partículas en el lecho, el flujo de aire que pasa a través del fluidizador pasando a través de la placa. Como es un sistema en continuo, la masa de aire que pasa a través del rotámetro es igual al que pasa a través del lecho:

$$Q_3 = Q_2 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_3} \tag{3}$$

Donde  $\rho_3$  es la densidad del aire en el lecho, a las condiciones de la presión P3:

$$P_3 = P_{atm} - \Delta P_{cyclon} - \frac{\Delta P_{column}}{2} \tag{4}$$

Los datos tomados para la muestra de carbón tamaño -18 +30 con un flujo de aire de 1,56 x 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/s medido con el rotámetro, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos tomados para el valor de flujo en la velocidad de fluidización de carbón malla -18+30

$\rho_2$ (kg/m <sup>3</sup> )	2.511
$\rho_3$ (kg/m <sup>3</sup> )	0.983
Q2 (m <sup>3</sup> /s)	2.4876x10 <sup>-4</sup>
Q3 (m <sup>3</sup> /s)	6.3560x10 <sup>-4</sup>
Vsa (m/s)	0.1207

Con los datos relativos a la pérdida de presión en el lecho y las velocidades calculadas con anterioridad a la superficie del aire, el siguiente paso es la construcción de la curva de registro de DP vs Vsa registro, con el fin de determinar la velocidad mínima de fluidización experimental, Vmf.

Los resultados se grafican para obtener tanto las curvas de la cama ascendentes y las descendentes de la cama para cada una de las muestras analizadas. De estas cifras se puede determinar la Vmf, en el punto donde Registro D P deja de ser constante en la curva de fluidización de la cama descendente. Un ejemplo de las curvas obtenidas se ilustra en la Figura 3.

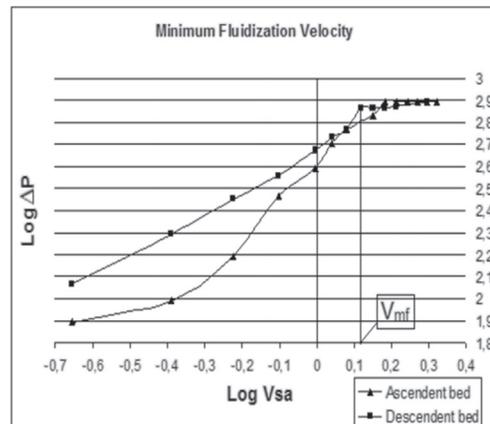


Figura 3. Procedimiento grafico para encontrar la Vmf experimental

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Pruebas de fluidización

Tabla 3 se resumen las velocidades mínimas de fluidización promedio medido para el carbón en los diferentes tamaños de partículas.

**Tabla 3.** Vmf de carbón para diferentes granulometrías

Malla carbón	Tamaño partícula (mm.)	$V_{mf}$ promedio (m/s)
-10 +16	1.16 – 2.0	0.67
-16 +18	1.0 – 1.16	0.58
-18 +30	0.6 – 1.0	0.49
< 30	< 0.6	0.37

Los resultados obtenidos para la mezcla carbón biomasa son presentadas en la tabla 4.

**Tabla 4.** Vmf de mezclas carbón-biomasa

Mezcla	Proporción (% vol.)	$V_{mf}$ promedio (m/s)
Carbón – cascarilla arroz	75-25	0.56
	80-20	0.58
	85-15	0.62
	90-10	0.67
Carbón – Cisco de café	50-50	0.67
	75-25	0.58
	80-20	0.63
	85-15	0.67
Carbón - aserrín	90-10	0.71
	50-50	0.69
	75-25	0.52
	80-20	0.59
	85-15	0.63
	90-10	0.67

### 3.2 Densidad

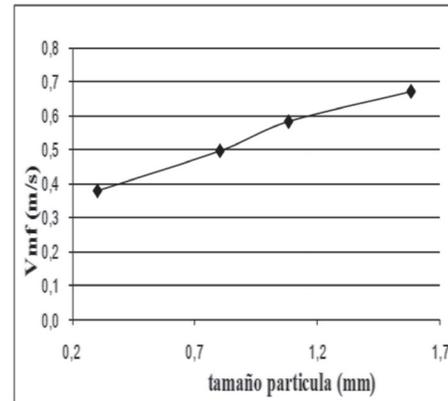
Los resultados de los cálculos de densidad promedio de partículas para cada material de prueba se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Densidad para cada material

Mezcla	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Carbón ripio	1327
Cascarilla de arroz	971
Cisco café	826
Aserrín	864

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El tamaño de particular recomendado de acuerdo a los resultados de fluidización en frío para el carbón es de 0.6 mm a 1mm. La variación de la Vmf con el tamaño de partícula se presenta en la Figura 4.

**Figura 4.** Variación de la Vmf con el tamaño de partícula del carbón

Las mezcla de carbón (malla 18-30) biomasa que mejores comportamientos presentaron a la hora de fluidizar son: carbón 75% - cascarilla de arroz 25% vol., carbón 85% -cisco de café a 15% vol. y del Carbón 80%- aserrín a 20% vol.

En general, las mezclas ensayadas presentan buena fluidización con  $V_{sa}$  alrededor de 0.71 m/s. Las mezclas se comportan de manera muy similar, sin embargo, aquellas con cisco de café son las que presentan mayores problemas para fluidizar, lo cual se refleja en velocidades mínimas de fluidización mayores en comparación con las de las mezclas con los otros tipos de biomasa.

Las velocidad máxima alcanzada para la fluidización de las mezclas oscila entre 0.65 y 1.7 veces la  $V_{mf}$ , aunque algunos autores aseguran que para gasificación de biomasa, la velocidad para fluidizar los sólidos debe ser mayor de 2.5 veces la  $V_{mf}$  para asegurar una buena homogeneidad de las partículas de biomasa con el otro material, ya sea arena, carbón o un catalizador [2].

Ya que las mezclas corresponden a sólidos de diferentes tamaños y naturaleza, la segregación depende de la composición del lecho. A altas velocidades del aire,

el lecho fluidizado muestra un buen mezclado de las partículas grandes (biomasa) y pequeñas (carbón). Cuando la velocidad disminuye, las partículas mayores se van al fondo del lecho y dejan de fluidizarse

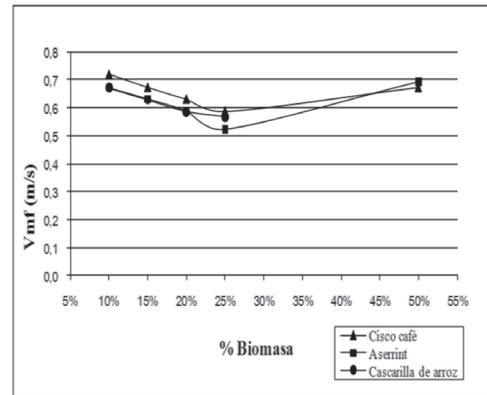
En las curvas obtenidas experimentalmente el comportamiento típico de la fluidización de un lecho de partículas se observó, se produce un aumento de la pérdida de presión hasta el punto en el que se alcanza un lecho totalmente fluido, es decir, un lecho burbujeante, de aquí en adelante la pérdida de presión se mantiene casi constante. El fenómeno de histéresis se observó también, porque la curva de velocidad decreciente es diferente de la obtenida de manera progresiva y su trayectoria se define mejor puesto que el flujo de aire no debe superar a las fuerzas de cohesión entre las partículas. Por ello, los parámetros experimentales obtenidos a partir de las curvas construidas se determinan a partir de los datos del lecho descendiente.

En los ensayos de fluidización de cada tipo de biomasa pudo observarse que ésta se comporta como los sólidos tipo C según la clasificación de Geldart (cohesivos), los cuales muestran una tendencia a adherirse, y a medida que se incrementa el flujo de gas, se abren canales que se extienden desde el distribuidor en la parte inferior del lecho hasta la superficie de este. Si se aplica un poco de vibración ya no se forman canales, sino que todo el lecho se eleva como un émbolo. A velocidades del gas mayores que permitan sobreponerse a los efectos cohesivos y aplicando agitación mecánica o vibración fuerte, este tipo de partículas fluidizan, pero en forma de racimos o aglomerados.

Las mezclas con un 50% de contenido en volumen de la biomasa presentan problemas al ser fluidizados, ya que se forma un canal central por donde pasa casi todo el aire. No fue posible determinar el valor de la  $V_{mf}$  confiable para la mezcla de cascarilla de arroz con el equipo disponible.

En las mezclas se presentan comportamientos similares independientemente de la biomasa utilizada, pues para las mezclas trabajadas se observa que la  $V_{mf}$  disminuye con el aumento de la proporción de biomasa. Sin embargo, el número de datos del que se dispone no es suficiente para asegurar que este comportamiento se mantendría siempre para otras mezclas. Se espera realizar más ensayos con mejores dispositivos de

medida de las variables más importantes: caída de presión en el lecho y velocidad de flujo de aire. La variación de la  $V_{mf}$  de fluidización con la proporción de biomasa en las mezclas con carbón se presenta en la figura 5.



**Figura 5.** Variación de la  $V_{mf}$  con la proporción de biomasa en la mezcla.

El arrastre de sólidos es bajo ya que no se presentaron caídas de presión significativas en el ciclón durante los ensayos de fluidización, se concluye que la cantidad de partículas que escapó del equipo es mínima. Los finos, que corresponden a polvillos de biomasa o de carbón, fueron arrastrados durante la expansión inicial del lecho que se realizó para medir la altura inicial del lecho en la primera corrida. Además para los ensayos con desperdicios de la industria maderera, se podría ensayar con otras especies de árboles y otros tamaños y formas de partícula, como viruta, astillas y polvos.

## 5. CONCLUSIONES

Varias combinaciones de productos de desechos agrícolas con carbón ripio fueron analizados para las condiciones de fluidización en frío, las proporciones recomendadas son: Carbón-Cascarilla de arroz 75%-25% vol. (93.7%-6.3% peso), Carbón-Cisco de café 90%-10% vol. (87.4%-12.58% peso) y Carbón-Aserriñ de roble 85%-15% (96.74%-3.26% peso).

No es posible fluidizar biomasa al 100% a las condiciones trabajadas, pues el lecho tiende a formar canales por los cuales pasa el aire mientras los sólidos permanecen estáticos. Este comportamiento es propio de los sólidos tipo C según la clasificación de Geldart por lo que se requiere el uso de materiales inertes para

mejorar las propiedades fluidodinámicas como por ejemplo la arena [2].

## REFERENCIAS

- [1] Pell M., Gas Fluidization. Handbook of Powder Technology, Volume 8. Elsevier. Holanda, 1990.
- [2] Hematy, M., Spieker, K., Laguérie, C., Alvarez, R. and Riera, F.A., Experimental study of sawdust and coal particle mixing in sand or catalyst fluidized beds. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 68, pp. 768 – 772, 1990
- [3] Felipe, C.A.S. and Rocha, S.C.S., Prediction of minimum fluidization velocity of gas–solid fluidized beds by pressure fluctuation measurements — Analysis of the standard deviation methodology. Powder Technology, 174, pp. 104-113, 2007
- [4] Formisani, B., Girimonte, R. and Longo T., The fluidization process of binary mixtures of solids: Development of the approach based on the fluidization velocity interval. Powder Technology, 185, pp. 97-108, 2008.
- [5] A. Kumar., Minimum Fluidization Velocity in Gas-Solid Fluidized Beds with Co-axial Rod and Disk Promoters. Indian Chem. Engr., Section A, 44, pp. 256-260, 2002.
- [6] Rao, T. R. and Ram. Bheemarasetti, J.V., Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands, Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology, New Delhi 110016, India, 2001.
- [7] Geldart, D., Types of gas fluidization, Powder Technol. 7, pp. 285– 292, 1973.
- [8] Hariprasad J. Subramani, M.B. Mothivel Balaiyya, Lima Rose Miranda Minimum fluidization velocity at elevated temperatures for Geldart's group-B powders. Experimental Thermal and Fluid Science, 32, pp. 166-173, 2007
- [9] Clarke, K.L., Pugsley, T. and Hill, G.A., Fluidization of moist sawdust in binary particle systems in a gas–solid fluidized bed. Chemical Engineering Science, 60, pp. 6909-6918, 2005.
- [10] Heping C., and Grace, J. R., Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects. Chemical Engineering Science, 62, pp. 45-55, 2007.
- [11] Abdullah, M.Z., Husain, Z. and Yin Pong, S.L., Analysis of cold flow fluidization test results for various biomass fuels. Biomass and Bioenergy, 24, pp. 487-494, 2003.
- [12] Lv., P.M., Xiong, Z.H., Chang, J., Wu, C.Z., Chen, Y. and Zhu, J.X., An experimental study on biomass air–steam gasification in a fluidized bed. Bioresource Technology, 95, pp. 95-101, 2004.