

FLOCULACIÓN DE JUGOS EN LA INDUSTRIA AZUCARERA SEGÚN LA TEORÍA DE KYNCH

FLOCCULATION OF JUICES IN THE SUGAR INDUSTRY ACCORDING TO THE THEORY OF KYNCH

GARCÍA ENRÍQUEZ F. A.

RESUMEN

La aplicación de la teoría de Kynch permite obtener las velocidades de sedimentación para la obtención de jugo clarificado en la industria azucarera. Bastará medir la altura descendida de la interfase del lodo por unidad de tiempo en diferentes instantes utilizando una probeta graduada de 1000 ml. El empleo además permite establecer la variedad o marca de floculante a utilizar, así como su dosificación óptima para determinados tipos de jugos. Para la verificación de esta teoría se dosificó 2 mg/l, 4 mg/l y 6 mg/l de floculante, respectivamente sobre probetas de 1000 ml (35 cm) con jugo sulfoenaldado a 103 °C. Las curvas de Kynch indicaron que la aplicación de 2 mg/l del polielectrolito aniónico favorece la velocidad de floculación con mayor espesamiento del lodo (33,16 Bé). Por el contrario, el uso de 6 mg/l ocasiona la formación de flóculos demasiado grandes con una sedimentación lenta, formando lodos de 28,64 Bé.

PALABRAS CLAVE

PERFORACIÓN, CASING DRILLING,
DISPOSICIÓN DE AGUA, COSTO

ABSTRACT

The application of the Kynch theory allows to obtain the sedimentation rates for obtaining clarified juice in the sugar industry. For this, it will be enough to measure the height of the mud interface descended per unit of time at different moments using a 1000 ml graduated cylinder. The use of this theory also allows establishing the variety or brand of flocculant to be used, as well as its optimal dosage for certain types of juices. For the verification of this theory, 2 mg/l, 4 mg/l and 6 mg/l of a flocculant were dosed, respectively, on 1000 ml (35 cm) test tubes with sulfo-lime juice at 103 °C. The Kynch curves indicated that the application of 2 mg/l of the anionic polyelectrolyte favors the flocculation speed with greater thickening of the mud (33,16 Bé). On the contrary, the use of 6 mg/l causes the formation of too large flocs with a slow sedimentation, forming sludges of 28.64 Bé

KEYWORDS

PERFORACIÓN, CASING DRILLING,
DISPOSICIÓN DE AGUA, COSTO.

INTRODUCCIÓN

CLARIFICACIÓN DE JUGO

En la industria azucarera se realizan operaciones de purificación de jugo, y una etapa de especial importancia es la de clarificación, consistente en la separación definitiva del lodo por métodos fisicoquímicos para obtener un jugo claro, brillante y de mejor calidad, apto para ingresar en la etapa de evaporación.

Para efectuar el análisis de la sedimentación de partículas suspendidas en el jugo de caña, debe tomarse en cuenta que éste es un material coloidal estable, y lo que se pretende es desestabilizarlo a fin de que se produzca la clarificación.

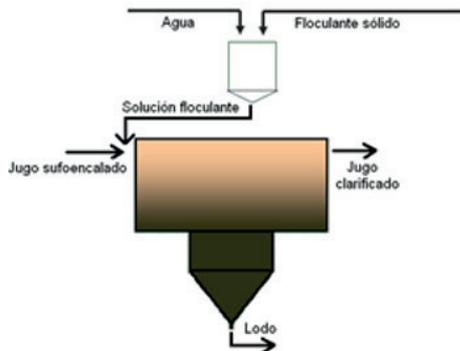


Fig. 1 Esquema de la clarificación de jugo en fábrica de azúcar

La velocidad terminal de una partícula se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$v_t^2 = \frac{4}{3} D \cdot g \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

Sin embargo, para resolver la ecuación (1) es necesario conocer el factor de fricción "f", que es función del número de Reynolds en forma distinta y de acuerdo con el rango del mismo.

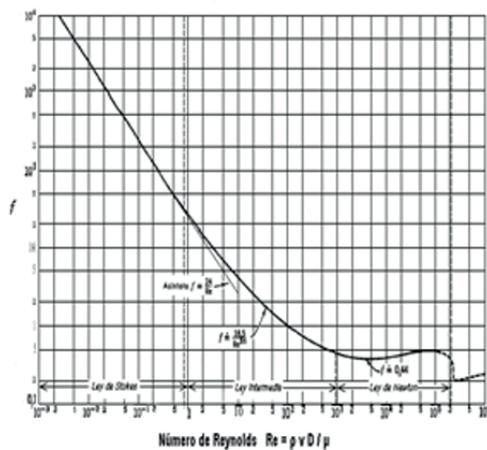


Fig. 2 Factor de fricción para esferas que se mueven en un fluido en función del número de Reynolds. (C.E. Lapple, "Dust and Mist Collection")

La Fig. 2 identifica cuatro zonas bien diferenciadas, en las cuales puede notarse la dependencia del factor de fricción con el número de Reynolds.

Para: $Re < 0,1$ ó 1
reemplazando:

$$f = \frac{24}{Re} \quad \text{en (1)}$$

$$v_t = \frac{1}{18} \frac{D^2 \cdot g}{\mu} \cdot (\rho_s - \rho) \quad (2)$$

D_{max} para $Re < 0,1$ ó 1

La ecuación (2) es conocida como: Ley de Stokes, de aplicación restringida en la sedimentación de partículas coloidales, tomando en cuenta que es válida para números de Reynolds (basados en el diámetro de la esfera) menores que 0,1, pudiéndose extender en la práctica hasta 1.

Esto deduce, que toda partícula coloidal sedimentará si tiene un diámetro entre $0,1 \mu m$ y $0,5 \mu m$. A menor diámetro, el movimiento browniano impide la sedimentación, y a mayor diámetro; aproximadamente para $Re = 1$, esta ley predice una fuerza resistente que es un diez por ciento mayor.

La aplicación de un polielectrolito sobre el jugo sufoencalado tiene precisamente la tarea de agrupar aquellas partículas de diámetro muy pequeño, de manera que se formen otras de mayor tamaño y puedan someterse a la Ley de Stokes.

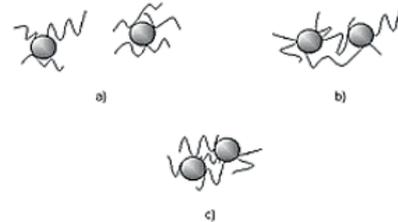


Fig. 3 Acción del floculante sobre una partícula desestabilizada
a) Fijación del floculante sobre la partícula. b) Efecto de puente
c) Floculación.

Teoría de Kynch de la sedimentación discontinua

El comportamiento de las suspensiones concentradas durante la sedimentación ha sido analizado por Kynch, utilizando sobre todo consideraciones de continuidad. Las suposiciones básicas realizadas son las siguientes:

La concentración de partículas es uniforme a través de cualquier capa horizontal, los efectos de pared pueden despreciarse, no existe una sedimentación diferencial de partícula debida a diferencias de tamaño, forma o composición, la velocidad de caída de las partículas depende únicamente de la concentración local de partículas, la concentración inicial, o es uniforme o aumenta hacia el extremo inferior de la suspensión, y la velocidad de sedimentación tiende a cero al aproximarse la concentración a un valor límite correspondiente al de la capa de sedimento depositada en el fondo del recipiente.

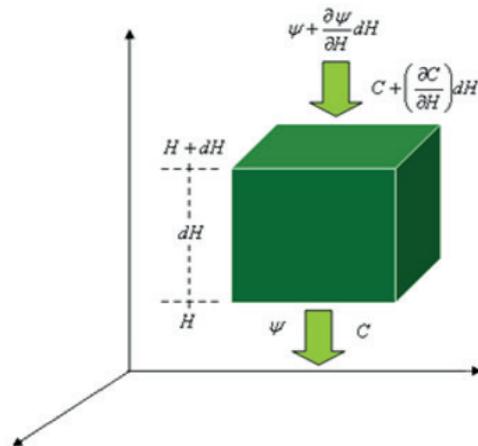


Fig. 4 Contribuciones (entrada-salida) de materia sobre un elemento de volumen de jugo durante la sedimentación.

Eligiendo como sistema de control un elemento de volumen regular, y caracterizando las contribuciones de materia a nivel microscópico sobre él:

Donde:

$$\psi + \frac{\partial \psi}{\partial H} dH \Rightarrow \text{densidad de flujo en la entrada } \frac{g}{\text{cm}^3 \cdot \text{min}}$$

$$\psi \Rightarrow \text{densidad de flujo en la salida } \frac{g}{\text{cm}^3 \cdot \text{min}}$$

Con:

$$H \Rightarrow \text{altura del elemento de volumen } \text{cm}$$

$$v_p \Rightarrow \text{velocidad de precipitación } \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

$$C \Rightarrow \text{concentración volumétrica } \frac{g}{\text{cm}^3}$$

Por tanto:

$$\psi = C v_c$$

Aplicando el Balance de materia:

entrada - salida = acumulación

$$\left(\psi + \left(\frac{\partial \psi}{\partial H} \right) dH - \psi \right) dt = \left(\frac{\partial C dH}{\partial t} \right) dt$$

es decir:

$$\frac{\partial \psi}{\partial H} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Por otra parte, puesto que ψ sólo depende de C:

Por tanto

$$\frac{\partial \psi}{\partial H} = \frac{\partial \psi}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial H} = \frac{d\psi}{dC} \cdot \frac{\partial C}{\partial H}$$

En general, la concentración de partículas será función de la posición y del tiempo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial C} \cdot \frac{\partial C}{\partial H} = 0 \quad (3)$$

y

$$C = f(H, t)$$

Por tanto, las condiciones de concentración constante se definen en la relación:

$$\frac{\partial C}{\partial H} dH + \frac{\partial C}{\partial t} dt = 0$$

Luego reemplazando (4) en (3) se obtiene la siguiente relación para concentración constante:

$$\frac{\partial C}{\partial H} = - \frac{\frac{\partial C}{\partial t}}{\frac{dH}{dt}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial \psi}{\partial C} \left(- \frac{\frac{\partial C}{\partial t}}{\frac{dH}{dt}} \right) = 0 \quad (5)$$

Pero:

$$v_p = \frac{dH}{dt}$$

Entonces:

$$- \frac{d\psi}{dC} = \frac{dH}{dt} = v_p \quad (6)$$

Como la ecuación (6) se refiere a una concentración constante, $d\psi/dC$ es constante y $v_p = dH/dt$ es por tanto también constante para una concentración dada, siendo la velocidad de propagación de una zona de concentración, C, constante. Así, en una representación de H frente a t, las líneas de pendiente constante se referirán a zonas de composición constante, cada una de las cuales se propagará a una velocidad constante, dependiendo únicamente de la concentración.

Esta teoría es capaz de describir el comportamiento de la sedimentación en diferentes momentos, realizando el ensayo previo sobre jugo sulfoenclado a 103 °C, utilizando el polímero aniónico correspondiente a la operación. Se trata de una sedimentación intermitente, en la que el flujo de materia fuera del sistema es nulo, transcurriendo en régimen no estacionario tal como puede efectuarse en una probeta de laboratorio.

A partir de los resultados obtenidos en ensayos discontinuos, puede realizarse el diseño de un sedimentador continuo. La prueba se inicia con la dosificación del floculante dentro de una probeta de 1000 ml, y sobre el cual se vierte el jugo enclado caliente hasta completar el volumen. En consecuencia, el descenso de lodo observado, es registrado a través de lecturas sucesivas de cada altura, H (cm) vs el tiempo t (min).

$$C_0 H_0 = C_n H_n \quad (7)$$

La curva trazada (Fig. 5) comprende diversas zonas de sedimentación en función de la velocidad, lo cual significa que el proceso consta de diferentes etapas. En un principio, el sólido que se encuentra en una concentración inicial X0, empieza a sedimentar, estableciéndose una interfase entre la superficie de capa de sólidos que sedimentan y el jugo clarificado que queda en la parte superior (zona A). La concentración de lodo en esta zona es uniforme, sedimentando como una misma capa de materia a velocidad constante Vs, la que puede determinarse a partir de la pendiente de la curva trazada. La zona debajo del jugo clarificado se denomina zona interfacial (zona B).

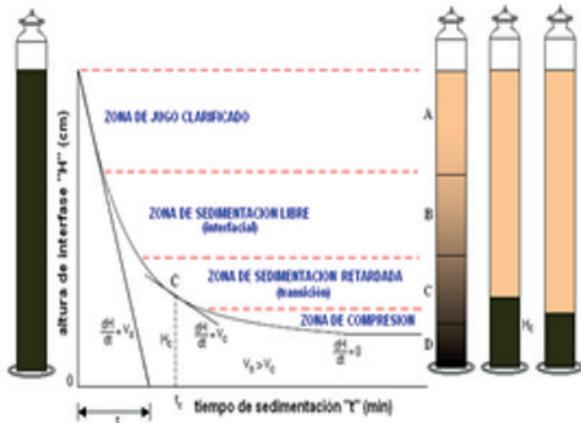


Fig 5. Análisis de las zonas de sedimentación

Simultáneamente a la formación de estas zonas, se produce la acumulación y compactación de sólidos (lodo) en suspensión en el fondo de la probeta, dando lugar a la denominada zona de compactación (zona D). En esta zona la concentración de sólidos en suspensión es también uniforme y la nueva interfase que bordea esta zona, avanza en sentido ascendente en el cilindro con una velocidad constante V .

Entre la zona interfacial y la zona de compactación se encuentra la zona de transición (zona C). En esta zona, la velocidad de sedimentación de lodo disminuye debido al incremento de la viscosidad y de la densidad de la suspensión, modificando la concentración de lodo gradualmente entre la zona interfacial y la de la zona de compactación.

Las zonas de compactación e interfacial pueden llegar a encontrarse, produciendo la coalescencia de las dos interfaces ya citadas, en el denominado momento crítico t_C , desapareciendo la zona de transición. En este momento, el lodo sedimentado tiene una concentración uniforme X_C o concentración crítica, comenzando la compactación y alcanzándose, posteriormente, la concentración final X_u .

La velocidad de sedimentación en el momento t_C corresponde a un valor V_C dado por la pendiente de la tangente a la curva de sedimentación en el punto C. Además, el análisis matemático correspondiente demuestra que $V_C < V_S$.

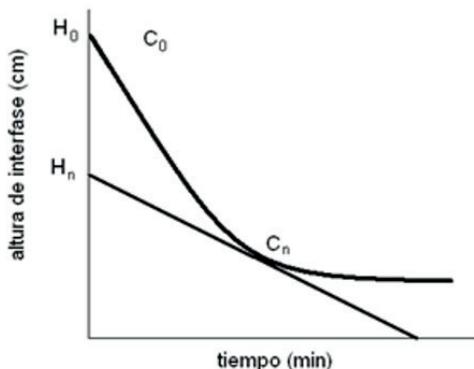


Fig. 6 Aplicación del modelo matemático de Kynch

En consecuencia, el análisis de Kynch se apoya en la ley de sedimentación inhibida; a mayor concentración de sólidos, menor velocidad de sedimentación.

Con la construcción de la curva es posible determinar la concentración del lodo aplicando el modelo matemático de Kynch.

La ecuación (7) es el modelo matemático de Kynch, con el cual, a partir de la altura H_0 y concentración C_0 conocidas, se toma un punto C_n de la curva y se traza una recta tangente a ese punto hasta su intersección con el eje de las ordenadas, donde se lee el valor H_n . Finalmente se determina C_n aplicando la ecuación.

En fábrica de azúcar, la aplicación de floculantes hace posible la aglomeración de las partículas de diámetro muy pequeño existentes en el jugo de caña, con el propósito de que puedan sedimentar.

De esta manera, el uso correcto de un determinado floculante determina (entre otros factores), la desestabilización del sistema coloidal y su consecuente sedimentación.

Se verificará el cumplimiento de la Teoría de Kynch sobre la clarificación de jugo en la industria azucarera.

Se determinará las velocidades de sedimentación en idénticas muestras de jugo sulfoenclado.

Se establecerá criterios que determinen la dosificación óptima floculante aniónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES

Tres probetas de 1000 ml, cronómetro, tres pipetas graduadas de 5 ml, jugo sulfoenclado a 103 °C, floculante aniónico.

MÉTODO

Sobre tres probetas vacías de 1000 ml, dosificar 2mg/l, 4 mg/l y 6 mg/l del polielectrolito respectivamente.

A continuación, verter sobre cada probeta el jugo sulfoenclado y realizar las lecturas que correspondan a las alturas de interfase por unidad de tiempo.

Graficar altura, H (cm) vs tiempo (min).

Determinar las velocidades de sedimentación y las concentraciones de lodo en el punto crítico según la teoría de Kynch.

RESULTADOS

Tabla 1. Alturas de sedimentación en cm de tres muestras de diferente concentración

Tiempo (min)	Volumen de floculo (ml)		
	Muestra 1 (2 mg/l)	Muestra 2 (4 mg/l)	Muestra 3 (6 mg/l)
0	35,0	35,0	35,0
1	23,5	20,8	25,6
2	17,5	17,5	22,1
3	15,8	15,8	20,3
4	14,7	14,7	18,9
5	13,8	14,0	17,9
10	11,9	12,3	14,7
15	11,0	11,2	13,3
20	10,5	11,0	12,3
25	10,2	10,9	11,9
30	10,0	10,6	11,6
35	9,8	10,5	11,4
40	9,6	10,5	11,2
45	9,5	10,5	11,0
50	9,5	10,3	11,0

Aplicando el modelo matemático de Kynch:

$$C_0 H_0 = C_n H_n$$

C_0 (Bé) = 9,0 y H_0 (cm) = 35

Tabla 2. Valores del modelo matemático de Kynch

Muestra	H_n (cm) según curva	C_n de lodo (Bé), por Kynch
1	9,5	33,16
2	10,3	30,58
3	11,0	28,64

De la curva se obtiene:

Sobre muestra 1

$$V_1 = \frac{dH}{dt} = \frac{35 \text{ cm}}{2,28 \text{ min}} = 15,4 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

Sobre muestra 2

$$V_2 = \frac{dH}{dt} = \frac{35 \text{ cm}}{1,85 \text{ min}} = 18,9 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

Sobre muestra 3

$$V_3 = \frac{dH}{dt} = \frac{35 \text{ cm}}{3,15 \text{ min}} = 11,1 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

DISCUSIÓN

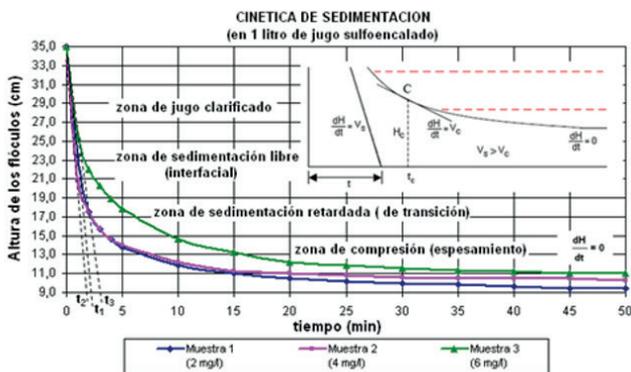


Fig.7 Curva de la cinética de Sedimentación

La sedimentación de floculos en la clarificación de jugo, puede ser descrita por la teoría de Kynch, toda vez que pueden identificarse

las diferentes zonas formadas hasta el continuo espesamiento del lodo, lo cual es esencial para la formación de cachaza en operaciones posteriores.

Se deduce entonces que la dosificación de 4 mg/l de floculante origina mayor velocidad de sedimentación. Sin embargo, con la aplicación de 2 mg/l se obtendrá mayor espesamiento de lodo. Por otra parte, la dosificación de 6 mg/l ocasiona la formación de floculos de gran tamaño que impiden su sedimentación, dejando espacios vacíos entre ellos y haciendo que se obstaculicen entre sí.

REFERENCIAS

Coulson, J. M. Richardson, J. F. Backhurst, J. R and Harker, J. H. (2003). Ingeniería Química. Tomo II. Operaciones Unitarias (Unidades SI). Barcelona: Reverté.
 Sharma, S.C.; P.C. Jobsey; A.S.G. Rao (1981). Cane juicephosphatos and clarification. International Sugar Journal 89 (985).
 Bird, R. Sterwrt, W. Lightfoot, E. (1982). Fenómenos de Transporte. Barcelona: Reverté.
 McCabe, Smith, (1972). Operaciones Básicas en Ingeniería Química. Barcelona: Reverté.
 Hugot, E. (1963). Manual para Ingenieros Azucareros. México: Continental.

