

5. DISEÑO DEL FERMENTADOR

La fermentación es el proceso en el cual, los azúcares se transforman en el alcohol etílico, por esto, es el punto más importante en la elaboración del bacanora, ya que durante este proceso se generan además, los compuestos que determinan la calidad del producto.

En este proceso la fermentación es anaerobia, es decir, se lleva a cabo sin presencia de aire.

Cuando las mieles ya fueron acondicionadas, se procede a preparar el inóculo el cual representa el 8% del volumen total de la carga y así dar inicio a la fermentación. Dicha etapa toma 72 horas en concluirse y se mantendrá a una temperatura constante de 80.6 °F [3].

Una vez llevada a cabo la fermentación, el jugo fermentado contendrá alrededor de 2.3 °Brix, 4.11% alcohol en volumen y 3.27% en peso. Esta carga de jugo seguirá por la etapa de destrozamiento en donde se separarán los constituyentes de la mezcla por vaporización.

Este equipo estará construido de acero inoxidable y el volumen a contener será de 208.83 pie³ de jugo, a esto se le ha incluido un Factor de Seguridad del 30%.

Para retirar el calor generado por la reacción se usará un serpentín sumergido en el líquido construido de acero inoxidable. Por éste circulará agua a 55 °F aproximadamente proveniente de una torre de enfriamiento.

5.1. Volumen del Fermentador

Según el calendario propuesto, se tendrán tres fermentaciones a la semana, cada lote a fermentar procesará 9657.7 lb de jugo a 10 °Brix y todavía a esa cantidad se le agrega el 8% en volumen de inóculo. La densidad del jugo es de 64.86 lb/ pie³ y para el inóculo es de 62.3 lb/pie³.

Partiendo de lo anterior, el volumen del tanque será:

$$V_{\text{jugo}} = \frac{M}{\rho} \tag{5.1}$$

$$V_{\text{jugo}} = \frac{M}{\rho} = \frac{9647.7 \text{ lb}}{64.86 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}} = 148.74 \text{ pie}^3$$

A eso se le sumará el 8% del inóculo y un factor de seguridad de 30% y nos queda:

$$V_{\text{fermentador}} = (148.74 \text{ pie}^3 * 1.08 * 1.3) = 208.83 \text{ pie}^3$$

5.2. Dimensiones del Fermentador

Si empleamos el criterio $L/D = 2$ [11] las dimensiones del fermentador que se obtendrán son:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 L \tag{5.2}$$

Sustituyendo el L en (5.2):

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 (2D)$$

$$V = \frac{\pi}{2} D^3 \quad (5.3)$$

Sustituyendo $V_{\text{fermentador}}$

$$208.83 \text{ pie}^3 = \frac{\pi}{2} D^3$$

Despejando D:

$$D = 5.10 \text{ pie}$$

$$L = 10.20 \text{ pie}$$

5.3. Selección del Material de Construcción

El material para este recipiente será el mismo que se ha venido proponiendo, acero inoxidable austenítico ASTM A 240- 304L, su esfuerzo permisible es de 15 700 lb/plg², este valor es válido para temperaturas de diseño desde -20 a 100 °F [14].

El material recomendado en los empaques para el recipiente es Neopreno [20].

5.4. Espesor de Diseño para el Tanque

El espesor de diseño para el casco se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$e_d = \frac{\rho (12 D)(H-1)}{144 (2 S E)} + c \quad (5.4)$$

Donde ρ se refiere a la densidad del jugo a fermentar y E, es la eficiencia de soldadura y para este equipo corresponde un 85% [12].

Substituyendo en la ecuación (5.4):

$$e_d = \frac{\left(64.86 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} * (12 * 5.10 \text{ pie}) * (10.20 \text{ pie} - 1) \right)}{144 \left(2 * 15700 \frac{\text{lb}}{\text{plg}^2} * 0.85 \right)} + \frac{1}{16} \text{ plg}$$

$$e_d = 0.072 \text{ plg} \approx \frac{3}{32} \text{ plg}$$

Podemos ver que el espesor de diseño es muy pequeño y poco común comercialmente [17]. El diámetro del equipo es de 5.10 pie, y podríamos considerarlo como un recipiente de almacenamiento cerrado, por lo que el espesor de diseño mínimo establecido para un recipiente con ese diámetro es de 3/16 plg [13].

$$e_d = \frac{3}{16} \text{ plg}$$

5.5. Selección de Tapa

El fermentador tendrá una tapa bridada y cuando ésta se abra, será girada sin necesidad de tener que sostenerla, pues un brazo pescante la sujetará. Dicho brazo estará unido al casco del tanque.

Se eligió este mecanismo para poder limpiar a conciencia el tanque, ya que cualquier residuo de fermentación anterior puede ocasionar una infección en la nueva levadura [11].

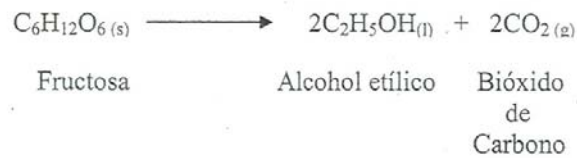
En los anexos de este trabajo se muestra un bosquejo de la tapa.

5.6. Espesor de Diseño para Tapa

El espesor para la tapa no requiere ser calculado, pues la función de ésta es evitar que haya pérdidas de la mezcla por evaporación natural. Por lo anterior se sugiere construir la tapa con un espesor de 1/8 de pulgada.

5.7. Calor Generado en la Fermentación

La ecuación química que ocurre durante la fermentación de fructosa, se expresa de la siguiente manera:



No obstante durante la fermentación alcohólica vía microorganismos, existe una producción colateral de pequeñas cantidades de otros compuestos. Sin embargo, como el etanol es el producto que se genera en mayor proporción y es el que se monitorea a través del proceso, es por eso que los cálculos que se presentan son en base a este alcohol.

Para calcular el calor generado por la reacción se hará uso de los calores de formación de los compuestos involucrados, los cuales fueron obtenidos de las tablas de calores de formación de compuestos orgánicos e inorgánicos en [15].

$$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{form.C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = -548285.66 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}}$$

$$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{form.CO}_2} = -169295.34 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}}$$

$$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{form.C}_2\text{H}_5\text{OH}} = -119017.22 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}}$$

DISEÑO DE FERMENTADOR

El calor de la reacción se expresa mediante la siguiente ecuación

$$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{rxn}} = \sum n \Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{productos}} - \sum n \Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{reactivos}} \quad (5.5)$$

Sustituyendo calores de los compuestos:

$$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{rxn}} = \left(\left[2 \left(-169295.34 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}} \right) + 2 \left(-119017.22 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}} \right) \right] - \left[-548285.66 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}} \right] \right)$$
$$\Delta \bar{H}^{\circ}_{\text{rxn}} = -28339.46 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}}$$

Ahora necesitamos conocer el calor que se produce por cada lb de fructosa que se fermente y eso se hace de la siguiente manera:

$$M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} = 180 \frac{\text{lb}}{\text{lb} \cdot \text{mol}}$$

$$Q = \left(-28339.46 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot \text{mol}} \right) * \left(\frac{1 \text{ lb} \cdot \text{mol}}{180 \text{ lb C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} \right) = -157.44 \frac{\text{Btu}}{\text{lb C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}$$

5.8. Cantidad de Fructosa Contendida en el Jugo a Fermentar

Los grados Brix nos indican los gramos de sacarosa contenidos por cada 100 gramos de solución [21] y se expresa de la forma siguiente:

$$^{\circ}\text{Brix} = \frac{\text{g sacarosa}}{100 \text{ g solución}} \quad (5.6)$$

Dado que el jugo a fermentar contiene 10 °Brix, los gramos de sacarosa contenidos en los 9647.7 lb de jugo (4376.123 Kg) son:

DISEÑO DE FERMENTADOR

$$\left(4376.123 \text{ Kg}_{\text{jugo}} * \frac{10 \text{ g sacarosa}}{0.1 \text{ Kg jugo}} \right) = 437612.3 \text{ g sacarosa} = 964.76 \text{ lb de sacarosa}$$

De [22] se tiene que la sacarosa se hidroliza para dar una mezcla equimolar de glucosa y fructosa. Por lo tanto, de las 964.76 lb de sacarosa, 482.38 lb son fructosa.

Entonces, del jugo que se fermente, la cantidad de calor que se debe retirar será:

$$Q = \left(-157.44 \frac{\text{Btu}}{\text{lb fructosa}} * 482.38 \text{ lb fructosa} \right) = -75945.90 \text{ Btu}$$

El tiempo de residencia del reactor es de 72 horas, por lo que el calor a retirarse por hora será:

$$Q_{\text{retirarse}} = \frac{-75945.90 \text{ Btu}}{72 \text{ horas}} = -1054.80 \text{ Btu}$$

5.9. Agua Necesaria para Enfriamiento

$$Q_{\text{retirarse}} = w_{\text{agua}} C_{p_{\text{agua}}} (T_1 - T_2) \tag{5.7}$$

Donde:

w_{agua} = Flujo del agua de enfriamiento, lb/h

$C_{p_{\text{agua}}}$ = Calor específico del agua de enfriamiento, Btu/ lb°F

T_1 = Temperatura del liquido de enfriamiento, °F

T_2 = Temperatura del liquido caliente, °F

El C_p del agua de enfriamiento se obtuvo de la Figura 3-11 de [15] siendo este igual a

$$1 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}}$$

DISEÑO DE FERMENTADOR

La temperatura del agua de enfriamiento T_1 , se obtuvo tomando en cuenta una humedad relativa de 35% y una temperatura media mensual de bulbo seco de 63.87 °F correspondiente al período de Octubre a Mayo en el municipio de Bacanora [24].

El valor para T_1 depende de la temperatura de bulbo húmedo, dicha temperatura se calcula con la ayuda de una carta psicométrica teniendo como datos la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa en la cual se lee una $T_{\text{bulbo húmedo}}$ de aproximadamente 50 °F.

La temperatura mínima a la que el agua puede enfriarse en una torre de enfriamiento corresponde a la temperatura de bulbo húmedo del aire, pero se sabe que la humedad relativa es cambiante durante todo el día [23], por lo que la T_1 difícilmente corresponderá a la de bulbo húmedo. Por lo que se toma una aproximación de 10° sugeridos en [23] para asegurar las condiciones del proceso, obteniéndose una temperatura de agua para enfriamiento de 55.5 ° F.

Mientras que T_2 corresponde a la 73.4 °F, temperatura del agua de salida del serpentín de enfriamiento en el fermentador.

Sustituyendo en (5.7):

$$-1054.80 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}} = w_{\text{agua}} * 1 \frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}} * (55.5 ^\circ\text{F} - 73.4 ^\circ\text{F})$$

$$w_{\text{agua}} = \frac{-1054.80 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}}{-17.9 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}} = 58.92 \frac{\text{lb agua}}{\text{hr}}$$

5.10. Selección del intercambiador de calor

Para el enfriamiento en el fermentador se propone que el intercambiador de calor sea un serpentín sumergido en el líquido. No se tienen referencias acerca de que si uso sea el menos adecuado, pues en los procesos de tequila y mezcal las fermentaciones son aerobias, pero se encontró en [25] que para tanques menores a 15 pie³ no es necesario enfriar con serpentines; pero si fuera el caso contrario, es decir, que fueran mayores a 15 pie³, se deberán usar.

5.11. Área de Transferencia de Calor

De [15] se encuentra la siguiente ecuación que nos ayuda a obtener el área de transferencia de calor de un serpentín sumergido en un líquido.

$$\ln \frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1} = \frac{wc}{MC} \left(\frac{k_2 - 1}{k_2} \right) \theta \quad (5.8)$$

$$y \quad k_2 = e^{\frac{UA}{wc}} \quad (5.9)$$

Donde:

T_1 = Temperatura del jugo durante la fermentación

t_1 = Temperatura del agua de enfriamiento en la entrada del fermentador

T_2 = Temperatura del agua de enfriamiento en la salida del fermentador

U = Coeficiente Global de transferencia de calor

w = Gasto a través del intercambiador del fluido frío

c_p = Calor específico del agua de enfriamiento

C_p = Calor específico del jugo a fermentar

M = Masa del fluido en el tanque

θ = Tiempo de residencia

A = Área del transferencia de calor

Substituyendo (5.9) en (5.8) y despejando A se obtiene:

$$A = \frac{wc_p}{U} \ln \left[\frac{1}{\ln \frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1} \cdot \left(1 - \frac{wc_p \theta}{MC_p} \right)} \right] \quad (5.10)$$

Para obtener el valor de U se hace un promedio de los valores aproximados de los coeficientes totales para diseño de enfriadores, el cual corresponde a 105 Btu/°F pie² h, esos valores se presentan en la tabla 8 en [23]. El valor incluye un factor de obstrucción total de 0.003.

C_p es el calor específico del jugo a fermentar y como no se tiene información de ese dato, se procede a calcularse mediante un promedio ponderado haciendo uso de los porcentajes en peso (ver diagrama de bloques).

Primeramente se localiza el C_p del agua y etanol puros en la Figura 3.11 para líquidos en [15] a la temperatura de 80.6 °F (Temperatura de operación).

$$C_{p_{\text{jugo}}} = \left(1 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} * 0.9673 \right) + \left(0.61 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} * 0.0327 \right) = 0.98 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$$

DISEÑO DE FERMENTADOR

Substituyendo en (5.10):

$$A = \left[\frac{58.92 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} * 1 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}}}{105 \frac{\text{Btu}}{^\circ\text{F} \text{ pie}^2 \text{ hr}}} \right] \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\ln \left(\frac{80.6^\circ\text{F} - 55.5^\circ\text{F}}{73.4^\circ\text{F} - 55.5^\circ\text{F}} \right)}{\left(\frac{58.92 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} * 1 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}}}{9647.7 \text{ lb} * 0.98 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}}} \right) * 72 \text{ hr}}} \right]$$

$$A = 0.7857 \text{ pie}^2$$

5.12. Longitud del Serpentin para Enfriamiento

Ahora bien para encontrar la longitud del serpentín y el número de vueltas emplearemos la siguiente expresión, en la cual d es el diámetro del serpentín y tendrá un valor de $\frac{1}{2}$ plg.

$$l = \frac{A}{\pi d} \tag{5.11}$$

Sustituyendo:

$$l = \frac{0.7857 \text{ pie}^2}{\pi * 0.0416 \text{ pie}} = 6.0 \text{ pie}$$

5.13. Número de Vueltas del Serpentin

De la Tabla 10 de [23] se obtiene que para un tubo de ½ plg, el valor de la superficie exterior por pie lineal es de 0.1309 pie² y el diámetro de vuelta de serpentin, $d_{\text{serpentin}}$, se sugiere de 0.80, esto basándose en el diámetro del fermentador.

$$\text{Área de Transferencia por vuelta} = \pi * d_{\text{serpentin}} * \frac{\text{Superficie externa}}{\text{pie lineal}} \quad (5.12)$$

$$\text{Área de transferencia por vuelta} = \pi * 0.8 \text{ pie} * 0.1309 \frac{\text{pie}^2}{\text{pie}} = 0.3289 \text{ pie}^2$$

$$\text{Número de vueltas} = \frac{0.7857 \text{ pie}^2}{0.3289 \text{ pie}^2} = 2.38 \approx 2.5$$

El espaciamiento entre vuelta de serpentin para un sistema de enfriamiento se sugiere sea de 2 pie para el caso de tubo de 2 plg y además, que su entrada debe estar por encima del nivel del líquido [15]. Por lo que para este trabajo se propone sea un espaciamiento de 0.80 pie.