

TRATAMIENTO DE LA VINAZA POR ELECTROCOAGULACIÓN

Romelia Hing Cortón, Elaine Ojeda Armaignac
Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente

En este trabajo se profundiza en el proceso de electrocoagulación al cual se somete la vinaza o mosto proveniente de la destilería de alcohol etílico, con el fin de separar los sólidos presentes en la misma para ser utilizados como materia prima para otros fines como es la obtención de inhibidores de la corrosión. Además de los sólidos, este mosto presenta otros factores agresivos como bajo pH y alta temperatura al salir de la columna de quema. En otros trabajos se demostró, que mediante el proceso de electrocoagulación, además de separar una gran cantidad de sólidos, se incrementaba el pH, y se elevaba la temperatura con que el mosto entra al proceso, por lo que al profundizar en el mismo, se analizó la influencia de las variables: tipo de electrodo, intensidad de corriente y tiempo de residencia, mediante un diseño de experimentos 2³, obteniéndose la combinación óptima de estas variables, las que permiten mayor cantidad de sólidos en la espuma y en el líquido. Para eliminar la temperatura como variable significativa, se diseñó un serpentín, el cual logra mantener la temperatura constante durante todo el proceso.

Palabras clave: electrocoagulación, licor residual de la destilería de alcohol etílico (mosto o vinaza).

This work profundices in the electrocoagulation process at which is someted the waste liquid proceeding from Hatuey Distillery with the objective of obtain the solids present in it to be utilized as corrosion inhibitors. With the solids this residual contains another agresive factors, such as low pH and high temperature. In others works it was demonstrated that by means of the electrocoagulation process can be separated a lot of solids and the pH value increases, but the temperature was greater, by this motive it was analized the influence of the variables: electrode type, intensity of current and residence time by means of experimental design 2³, obtaining the optimal combination of these variables that permits to obtain a greater quantity of solids in the foam and in the liquid. With the objective of eliminate the temperature as a significative variable, was design a cooling coil that permits to maintain the temperature constant during the electrocoagulation process.

Key words: electrocoagulation, waste licor of the alcohol etilic distillery.

Introducción

El medio marino constituye un todo integrado, y un componente esencial del sistema de sustentación de la vida, además, es un valioso recurso que ofrece posibilidades de desarrollo sostenible. Cada día resulta más evidente que la capacidad de depuración de los mares y océanos no es ilimitada, y que por consiguiente, la permanente descarga de las aguas residuales industriales, albañales, pueden provocar a largo plazo la degradación de la calidad global del agua marina.

Uno de los residuales que contamina la bahía de Santiago de Cuba es el mosto de desecho de la destilería Hatuey, en cuya composición hay compuestos que, como se ha demostrado en trabajos

anteriores, pueden ser reutilizados con diferentes fines, entre ellos como inhibidores de la corrosión.

En los últimos años se viene realizando un gran esfuerzo para resolver dicho problema, mediante la aplicación de la Producción Más Limpia (PML), de modo que, algunos productos que contienen desechos puedan ser utilizados en beneficio de la humanidad.

En otros trabajos se ha sometido el mosto residual a un proceso de electrocoagulación para eliminar uno de los principales elementos que constituyen parte de la agresividad de este residual, y es el gran contenido de sólidos que posee, los cuales pueden utilizarse como materia prima en otros procesos.

A través de la electrocoagulación, además de

botar gran cantidad de sólidos, se eleva el pH, efecto que conviene para eliminar factores agresivos del mosto, pero se eleva la temperatura, cuestión que no conviene, por lo que, en aras de resolver esta situación, se desarrolló el presente trabajo.

Objetivo general

Determinar las condiciones operacionales más eficientes para la separación de los sólidos presentes en el residual, a través del método de electrocoagulación, eliminando la temperatura como variable significativa, manteniéndola constante a través de un sistema de enfriamiento.

Materiales y métodos

La muestra tratada en el presente trabajo es el mosto, residual de la destilería Hatuey de la provincia Santiago de Cuba. La vinaza, como también se conoce, se obtiene del proceso de destilación de alcohol a partir de las mieles finales de la industria azucarera, y a una temperatura de 94 °C, es vertida directamente al río Yarayó.

Los electrodos utilizados en el proceso de electrocoagulación fueron de dos tipos:

- Una aleación de aluminio.
- Una aleación de hierro.

El orden en que fueron realizadas las tareas se muestra en el siguiente esquema experimental.

1. Diseño del serpentín
2. Desarrollo del método de obtención del sólido.
 - a. Electrocoagulación.
 - b. Centrifugación.
 - c. Secado.
 - d. Pesaje.
3. Análisis del funcionamiento del serpentín.
4. Análisis del rendimiento del sólido.

En trabajos anteriores, la temperatura se elevaba durante el proceso de electrocoagulación, lo que perjudica el rendimiento de los sólidos obtenidos, por lo que se recomendó mantener constante la temperatura durante este proceso, de forma que esta variable deja de ser determinante dentro del proceso.

Para llevar a cabo el diseño del serpentín, se siguió el siguiente algoritmo de cálculo:

1. Balance térmico para calcular el flujo de agua de enfriamiento.
2. Cálculo de la media logarítmica de la diferencia de temperatura.
3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor para el agua.
4. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor para el mosto.
5. Cálculo de la longitud del tubo.

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza se utilizó un electrocoagulador a escala de laboratorio, en el cual se introdujeron los electrodos planos, dispuestos verticalmente. Además se instaló el serpentín previamente diseñado para mantener constante la temperatura dentro del electrocoagulador. Los electrodos se energizaron, utilizando una fuente de corriente directa, en la que se regula la corriente aplicada al sistema.

Descripción del proceso de electrocoagulación

La vinaza se introduce en el electrocoagulador a temperatura ambiente, seguidamente se energiza el sistema usando la fuente de corriente directa, a un voltaje y una intensidad específicos. Instantáneamente, de las placas metálicas que trabajan como cátodos, comienzan a desprenderse, pequeñas burbujas de hidrógeno. La intensidad de burbujeo es directamente proporcional a la intensidad de corriente aplicada. Al cabo de unos minutos, en las proximidades de las placas negativas (cátodos) comienzan a formarse, unos pequeños flóculos, los cuales van creciendo, pudiendo tener tres destinos:

- precipitar al fondo del equipo,
- incrustarse en las placas negativas,
- ser arrastrados a la superficie del líquido, por las micro burbujas de hidrógeno y oxígeno, formándose una espuma.

La temperatura en el sistema se mantiene constante, debido al intercambio con agua a temperatura ambiente, la cual circula a través del sistema de enfriamiento instalado.

A medida que transcurre el proceso, el volumen de espuma se incrementa. Al pasar el tiempo prefijado, se desenergiza el sistema, se remueve la espuma, y se evacua el líquido a un recipiente. A continuación se pone a secar la espuma en la estufa, y se procede a centrifugar el líquido tratado para acelerar la floculación; el sólido floculado se extrae de la centrífuga en forma de lodo, se pone a secar en la estufa, y cuando está totalmente seco, se pesa, y queda listo para ser envasado.

Análisis estadístico

Con el objetivo de estudiar la influencia de las variables en el proceso de electrocoagulación, para obtener mayor cantidad de sólidos, los cuales serán posteriormente utilizados como inhibidores de corrosión, se desarrolló un diseño de experimentos factorial 2^k , con el fin de planificar los experimentos de la forma más racional posible, de manera que los datos obtenidos puedan ser procesados adecuadamente, y que un análisis objetivo con-

duzca a deducciones aceptables del problema planteado.

Un primer aspecto es tener en consideración el conjunto de factores que influyen en el proceso, y los posibles efectos que tendrán los mismos. Todo esto hace que el diseño de los experimentos tenga un papel fundamental una vez analizados esos elementos.

En los experimentos que se realizan en el proceso de electrocoagulación, se consideran variables que tienen una gran influencia, como son: tipo de electrodo, la intensidad de corriente y el tiempo de exposición.

En estos diseños se utilizan dos niveles para cada variable (superior e inferior), y k denota el número de variables independientes o factores, como se muestra a continuación:

Con dos niveles y tres variables independientes (2^3) quedan determinadas ocho experiencias distintas para hallar los seis valores de las variables dependientes.

Niveles de las variables utilizados en el experimento

	Nivel inferior	Nivel superior
Variable independiente	-1	+1
Tipo de electrodo	Aluminio	Hierro
Tiempo de la corriente (A)	5	10
Tiempo de Electroagulación (min)	30	50

Resultados obtenidos

En el diseño del serpentín

Variable	Valores obtenidos
Flujo de calor transferido	50 W
Flujo de agua necesario	4,31 kg/h
Longitud del tubo (calculada)	2,89 m
Longitud del tubo (real)	3,3 m

Resultados obtenidos de los sólidos de la espuma y del líquido con las variables analizadas

Tipo de electrodo	Intensidad de corriente (A)	Tiempo de residencia (min)	Sólido en la espuma (g)	Sólido en el líquido (g)
Fe	5	30	0,25	8,55
Al	5	50	5,35	13,37
Fe	10	30	1,19	11,45
Al	5	30	0,79	9,48
Fe	5	50	0,39	9,35
Al	10	30	5,27	12,85
Fe	10	50	4,46	15,82
Al	10	50	9,15	14,82
Fe	5	30	0,27	8,17
Al	5	50	5,76	14,8
Fe	10	30	1,86	11,98
Al	5	30	1,80	8,98
Fe	5	50	0,83	9,19
Al	10	30	7,52	13,25
Fe	10	50	3,45	16,05
Al	10	50	7,93	15,49

Mediante el análisis de varianza, se determina la significación estadística de los factores y la prueba de calidad de ajuste del modelo.

El procesamiento de los datos se realizó a través del programa STATGRAPHICS PLUS 5.1, y como el intervalo de confianza escogido

para este diseño es de un 95 % de probabilidad, todos los factores e interacciones que tengan un valor probable mayor de 0,05, no tienen significación estadística, y por lo tanto, deben eliminarse. En este caso los términos que tienen el p-valor mayor que 0,05 son los siguientes:

1. Interacción intensidad de corriente - tipo de electrodo.	1. Interacción tiempo de residencia - tipo de electrodo.
2. Interacción tiempo de residencia - intensidad de corriente.	3. Interacción tiempo de residencia - intensidad de corriente.

Después de eliminar las interacciones que no tienen significación estadística, se hizo un nuevo

análisis de varianza, y se obtuvieron los siguientes modelos matemáticos, que aunque no represen-

ten con toda la exactitud requerida el comportamiento matemático del proceso, permiten conocer la influencia que, en general, ofrecen los factores en la variable respuesta, que es, en este caso la cantidad de sólidos obtenidos en la espuma y en el líquido.

Sólido en la espuma = $-5,836\ 25 + 1,186\ 25*TE + 0,634\ 75*Int + 0,114\ 812*T - 0,173\ 75*TE*Int - 0,045\ 312\ 5*TE*T$.

Sólido en el líquido = $0,463\ 75 - 2,7037\ 5*TE + 0,745\ 5*Int + 0,151\ 125*T + 0,256\ 5*TE*Int$

donde:

TE: tipo de electrodo

Int: intensidad de corriente en amperes

T: tiempo en minutos.

Análisis de los resultados

De todo este análisis se concluye que, para el sólido obtenido en la espuma, el tipo de electrodo es la variable más significativa, ya que es la que tiene mayor influencia en la cantidad de sólido obtenido.

De los dos electrodos, el aluminio es el que nos brinda un mayor rendimiento, debido a que sus iones, al disolverse en la solución forman compuestos que promueven la floculación, coagulación y sedimentación en mayor proporción que con el electrodo de hierro.

El mayor valor de intensidad de corriente es el que promueve la mayor cantidad de sólidos obtenidos, tanto en la espuma, como en el líquido, debido a que:

1. permite la disolución de los ánodos, que son los que aportan los cationes a la solución (que luego formarán los óxidos),
2. desestabiliza los coloides que se encuentran en la solución,
3. suministra la energía necesaria para que se lleven a cabo las reacciones de formación de los sólidos metálicos, que subirá a la superficie debido a los gases (H_2 y O_2) que ascienden como consecuencia de la electrólisis del agua.

Analizando el tiempo de residencia, se observa que, a mayor valor de éste, aumenta la cantidad de

sólidos en la espuma, debido a que se producen más gases, los que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie, y para los sólidos en el líquido, también es una variable de gran influencia, pues a mayor tiempo se promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación.

De las tres variables analizadas para el sólido obtenido en la espuma, el tipo de electrodo y la intensidad de corriente, son los de mayor significación, pues son los que determinan el volumen de gases desprendidos, que arrastran los sólidos a la superficie en forma de espuma.

Para los sólidos obtenidos en el líquido, el tipo de electrodo es la variable de menor influencia en el rendimiento de los sólidos, ya que las variables intensidad de corriente y tiempo, son las determinantes en una electrólisis.

Conclusiones

1. El serpentín diseñado y montado en el proceso de electrocoagulación, mantuvo la temperatura constante durante el proceso; ésta fue la temperatura ambiente (30-31 °C).
2. Para los sólidos obtenidos en la espuma, las tres variables independientes analizadas fueron significativas, como son: tipo de electrodo, intensidad de corriente y tiempo de residencia, siendo la de mayor importancia el tipo de electrodo.
3. Las interacciones de las variables más significativas para el sólido obtenido en la espuma fueron tipo de electrodo-intensidad de corriente y tipo de electrodo-tiempo de residencia, donde para el electrodo de aluminio y la menor intensidad de corriente se obtuvo, prácticamente, igual rendimiento de sólido que para el electrodo de hierro y la mayor intensidad de corriente.
4. Para el sólido obtenido en el líquido, las tres variables independientes analizadas fueron significativas como son: tipo de electrodo, intensidad de corriente y tiempo de residencia, siendo la intensidad de corriente y el tiempo las de mayor influencia.

-
5. La interacción de las variables más significativas para el sólido obtenido en el líquido fue tipo de electrodo-intensidad de corriente, siendo la cantidad de sólido obtenido a la mayor intensidad de corriente independiente del tipo de electrodo.
 6. El material de construcción más adecuado para los electrodos del sistema es el aluminio.

Bibliografía

1. "Alternativas para tratamiento y purificación del agua por el método de electrocoagulación", disponible en: <http://www.geocities.com/seofeo555/Qoo3.html?200612>
2. Almeida, Pilar, Pérez, Jorge, Estudio de algunas vías de aprovechamiento de los efluentes de destilería. Revista ICIDCA, sobre los derivados de la caña de azúcar, N° 2, vol. XXI, pág. 4, 1987.
3. Andía Cárdenas, Yolanda; de Vargas, Lidia Barrenechea Martel, Ada, "Tratamiento de agua: coagulación floculación", Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico SEDAPAL, Lima, 2000.
4. Bourzac Suárez, Verónica, Mesa Mesa, Liliana, "Obtención de inhibidores ecológicos de la corrosión por electrocoagulación a partir de la vinaza", Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, 2006.
5. CITMA. "Introducción de la PML en la gestión ambiental", págs. 6-38, La Habana, 2002.
6. Colectivo de autores, "Características de la vinaza de destilería (mosto). Realizada por el grupo de tratamiento y aprovechamiento de residuales de la Facultad de Ciencias Nturales", Universidad de Oriente, 2004.
7. Crespo Sariol, Harold, "Proyecto de planta para reciclar el mosto de la destilería". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química, 2005.
8. Garcell L. R., col., *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1988.
9. Hing Cortón, Romelia, "Obtención de un inhibidor de la corrosión a partir del mosto de la destilería Hatuey", Revista Tecnología Química N° 1, 1980.
10. Morante, Gonzalo G., "Electrocoagulación de aguas residuales", Revista colombiana de física, vol. 34, N° 2, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2002. Disponible en:
11. http://calima.univalle.edu.co/revista/vol34_2/articulos/pdf/3402484.pdf.
12. Pávlov K. F., *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnologías químicas*, Editorial Mir, Moscú, 1981.
13. Perry J. H., Chilton C. H., *Chemical Engineers Handbook*, 6ta edición, t. I, McGrae Hill, New York, 1973.
14. Santiesteban, Carlos M., "Alternativas de disposición y aprovechamiento de los efluentes líquidos de la industria azucarera y derivados", Revistas ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar. pág. 40, N° 1, vol. XIX, 1985.
15. "Sólo agua pura. Electrocoagulación. Contaminantes. Beneficios", disponible en: <http://www.aquamanzi.com>.
16. Matos Tamayo, R., Hing Cortón R., *Aspectos fundamentales de la Química Física*, t. II, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1988.