

ESTUDIO DE LA COAGULACIÓN DE LA SUSPENSIÓN COLOIDAL DE AgI POR INFLUENCIA DE ALGINATO DE SODIO Y SULFATO DE ALUMINIO

**Nelson Tapia Huanambal¹, Miguel Alleca Chullca², Holger Maldonado García³,
Laura Lengua Calle³, Marta Bravo Ayala³**

1) Departamento de Fisicoquímica, Facultad de Química e Ingeniería Química, UNMSM. Av. German Amezaga 375, Lima, Perú. ntapiah@unmsm.edu.pe, ntapiah5@yahoo.com

2) Departamento de Fisicoquímica, Facultad de Química e Ingeniería Química, UNMSM. Av. German Amezaga 375, Lima, Perú. sccp.mallcca@gmail.com

3) Departamento de Química Analítica, Facultad de Química e Ingeniería Química, UNMSM. Av. German Amezaga 375, Lima, Perú. holger.maldonado@gmail.com, rlenguac@unmsm.edu.pe, mbravo@unmsm.edu.pe.

Recibido: Mayo de 2021; Junio de 2021

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar las condiciones óptimas de la coagulación de partículas coloidales de carga positiva de yoduro de plata por la acción de soluciones de alginato de sodio, iones de Al^{3+} y la acción mixta de ambos coagulantes. Las partículas coloidales de AgI de carga positiva se obtuvieron mediante la mezcla de soluciones diluidas de KI y $AgNO_3$ en exceso, el pH del sistema coloidal obtenido fue de 6. Los parámetros óptimos del proceso de coagulación se determinaron a base del método de Test de *Jarras*. Para la solución de alginato de sodio los parámetros óptimos fueron: concentración 0,04%, pH = 4,5 y un volumen de 25 mL; para el sulfato de aluminio: concentración 30 ppm, pH = 4,0 y un volumen 25 mL. En el caso de la acción mixta de ambos coagulantes los parámetros óptimos fueron: para la solución de sulfato de aluminio: concentración: 30 ppm, pH = 4, volumen 30 mL y para la solución de alginato de sodio: concentración 0,04%, pH = 4,5, volumen 20 mL. En base a estos parámetros, se estudió la cinética del proceso de coagulación de la suspensión de AgI mediante el método de turbidimetría y se determinó que el proceso de coagulación fue rápido, culminó aproximadamente a los 6 minutos.

Palabras claves: Coagulación, alginato de sodio, yoduro de plata.

ABSTRACT

The objective of the present work was to determine the optimal conditions for the coagulation of positive colloidal particles of silver iodide by the action of solutions of sodium alginate, aluminum sulfate and the mixed action of both coagulants. The suspension of colloidal particles of AgI was obtained by mixing diluted solutions of KI and $AgNO_3$ in excess, the pH of the colloidal system was 6. The optimal parameters for the coagulation process were determined based on the *Jarras* Test method. For the sodium alginate solution, the optimal parameters were: concentration 0.04%, pH = 4.5 and a volume of 25 mL; for aluminum sulfate: concentration 40 ppm, pH = 4.0 and a volume 25 mL, in the case of the mixed action of both coagulants, the optimal parameters were 30 mL of a 40 ppm solution of aluminum sulfate at pH 4.0 and 20 mL of a 0.06% sodium alginate solution at pH = 4.5. Based on these parameters, the kinetics for the coagulation process of the suspension of AgI was studied by means of the turbidimetry method and it was determined that the coagulation process was rapid and ended approximately 6 minutes after beginning of the process.

Keywords: Coagulation, sodium alginate, silver iodide AgI.

INTRODUCCIÓN

Las aguas naturales y residuales de diferentes procesos industriales contienen contaminantes: partículas coloidales, moléculas orgánicas, colorantes, bacterias e iones de metales pesados. Para separar a estos contaminantes se utiliza ampliamente el método de coagulación – floculación, debido a su bajo costo y eficiencia. Los coagulantes más utilizados en el tratamiento de

aguas residuales son las sales de aluminio *Al(III)*, hierro *Fe(III)* y polímeros sintéticos [1–3]. Sin embargo, estudios neuropatológicos y bioquímicos sugieren que el aluminio puede estar relacionado con la enfermedad de *Alzheimer* [4]. Los floculantes a base de polímeros sintéticos no son amigables con el medio ambiente, debido a que no son biodegradables, y cuando se degradan dan productos dañinos para la salud humana. Por esta razón, actualmente hay una tendencia hacia la utilización de polímeros de origen natural (biopolímeros) en los procesos de coagulación–floculación, entre estos tenemos a la quitina, quitosano [5–7], floculante a base de almidón [8], celulosa [9–11] y de alginato [12,13]. Estos biopolímeros también se usan como coadyuvantes de coagulación con coagulantes inorgánicos, así tenemos el caso de alginato de sodio con sulfato de aluminio y tetracloruro de titanio [14]. El alginato y el quitosano pueden formar complejos de alginato/quitosano con propiedades hidrofóbicas, que selectivamente pueden eliminar contaminantes de soluciones acuosas [15].

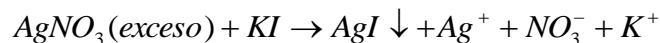
El alginato de sodio es un polisacárido abundante, que se obtiene de diversos tipos de algas pardas. Está formado por la asociación sucesiva de ácido manurónico y guluronico, en su estructura contiene el grupo carboxilo –*COONa*, el cual a un pH poco ácido se disocia, formando un polímero aniónico y cationes de sodio. Esta propiedad se usa para producir la coagulación de partículas coloidales de carga positiva, separación de microorganismos y colorantes catiónicos de efluentes textiles [16].

En el presente trabajo se han determinado los parámetros óptimos del proceso de coagulación–floculación de partículas suspendidas de yoduro de plata de carga positiva en agua, producido por el biopolímero alginato de sodio, sulfato de aluminio y soluciones mixtas de sulfato de aluminio con alginato de sodio. Utilizando los parámetros óptimos del proceso de coagulación correspondientes a ambos coagulantes, se ha estudiado la cinética del proceso de coagulación producido por la acción mixta de ambos coagulantes.

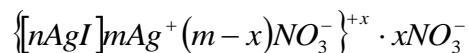
MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de la suspensión coloidal de yoduro de plata (AgI) de carga positiva. Se prepara una solución 0,012 M de *AgNO₃* (*Merck*) y una solución 0,006 M de *KI* (*Merck*). Para obtener la suspensión coloidal de yoduro de plata por el método de condensación química, se mezclaron las soluciones de *AgNO₃* y *KI* en una relación en volumen de 2:1. La mezcla se

mantuvo en agitación en un agitador magnético (*Hanna*) a 250 rpm durante 20 min, la reacción química es:



La partícula coloidal de AgI con su doble capa eléctrica se puede expresar del siguiente modo:



donde $[nAgI]$ representa el núcleo de la partícula coloidal, Ag^+ es el ion potencial determinante y NO_3^- es el ion contrario.

Solución de alginato de sodio y sulfato de aluminio. Un gramo de alginato de sodio de alto peso molecular en polvo (*Sigma – Aldrich*) se disolvió en 100 mL de agua destilada a la temperatura de 70°C mediante agitación constante con un agitador de paletas (*Hanna*) durante 1 h. Para preparar una solución de 1.000 ppm de Al(III), se pesó 12,35 g de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (*Merck*) y se disolvió y enraso con agua destilada en una fiola de un litro.

Determinación de la concentración óptima de alginato de sodio. De la solución 1% (W/V) de alginato de sodio por dilución se prepararon las siguientes soluciones: 0,01; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 y 0,1% en fiolas de 100 mL. En los vasos del equipo de jarras se colocaron 600 mL de la suspensión coloidal, y se ajustó el pH a 6,0 con soluciones 0,1N de NaOH y HCl, utilizando un pH-metro *Russell RL060P*. A cada uno de los seis vasos se agregó 50 mL de la solución de alginato de sodio de diferente concentración en forma sucesiva. Se procedió a agitar las soluciones a 100 rpm durante 3 min, enseguida a 30 rpm durante 10 minutos, y luego dejarlo reposar durante 20 min, después se midió la turbidez con un turbidímetro (*Hanna – HI 93703*). Los resultados se muestran en la Figura 1, se deduce que la concentración óptima de alginato para producir la coagulación es 0,04% a un pH = 6.

Determinación de la concentración óptima de la solución de sulfato de aluminio. A partir de la solución de 1.000 ppm de sulfato de aluminio se prepararon por dilución soluciones de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm en fiolas de 100 mL. En los 6 vasos del equipo de jarras se colocaron 600 mL de la suspensión coloidal y se ajustó el pH a 6. Luego se agregó 50 mL de cada una de las soluciones de sulfato de aluminio a los 6 vasos mediante agitación constante a 100 rpm durante 3 min, y después a 30 rpm durante 10 min. Se dejaron reposar durante 20 minutos. Enseguida se

tomaron muestras para medir la turbidez. Los resultados se muestran en la Figura 2, se deduce que la concentración optima de Al^{+3} es 40 ppm.

Determinación de la proporción óptima entre el volumen de alginato de sodio y sulfato de aluminio en el proceso de coagulación. Con la finalidad de determinar esta proporción, en los 6 vasos del equipo de jarras se colocaron 600 mL de la suspensión coloidal de AgI y se ajustó su pH a 6,0. En seguida se agregaron 0, 10, 20, 30, 40, y 45 mL en forma secuencial de la solución de sulfato de aluminio de 30 ppm a pH = 4,0. La mezcla obtenida se agitó durante 3 min a 30 rpm; luego se adicionó 50, 40, 30, 20, 10, y 5 mL de la solución 0,04% de alginato de sodio a pH = 4,5, y se procedió agitar la mezcla a 100 rpm durante 3 minutos, y después a 30 rpm durante 10 minutos. Se dejó reposar por 20 minutos y se midió la turbidez. Los resultados se muestran en la Figura 3, de donde se deduce que el volumen óptimo de la solución de alginato de sodio de 0,04% es 20 mL, y el volumen óptimo para el ion Al^{+3} de 40 ppm es 30 mL.

Cinética de la coagulación del sistema coloidal de AgI. Para estudiar la cinética del proceso de coagulación, se colocó 600 mL de la suspensión coloidal de AgI en un vaso de 1 L. En seguida se adicionó 30 mL de la solución de 40 ppm de Al^{+3} a un pH = 4,0, agitando la mezcla a 30 rpm durante 3 minutos e inmediatamente se adicionó 20 mL de la solución 0,04% de alginato de sodio a pH = 4,5 y se procedió a agitar a 100 rpm por 3 minutos, y finalmente a 30 rpm por 10 minutos. Luego, se trajeron periódicamente muestras de 10 mL de esta mezcla para determinar la turbidez. Los resultados se muestran en la Figura 4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coagulación en función de la concentración de alginato de sodio y sulfato de aluminio.

El alginato es un polisacárido que se encuentran en gran abundancia en las algas marinas pardas. En su estructura molecular contiene una gran cantidad de grupos ácidos $-COOH$, que dan lugar a la formación de sales con cationes que se encuentran en una solución acuosa, como $-COONa$. A un pH no muy ácido esta sal fácilmente se disocia dando lugar a la formación de un poli-anión e iones de sodio. Esta propiedad se utiliza para producir la coagulación de partículas coloidales de carga positiva y moléculas de colorantes catiónicos de la industria textil [14–16]. Por esta razón se ha utilizado el alginato de sodio en la coagulación de partículas coloidales de carga positiva de AgI. En la Figura 1 se muestra la gráfica de datos experimentales de la turbidez en función de la concentración de alginato de sodio, determinada mediante la técnica de prueba de Jarras (*Test de*

Jarras). De esta gráfica se deduce que la concentración óptima para producir la coagulación de las partículas suspendidas de carga negativa de AgI es 0,04%.

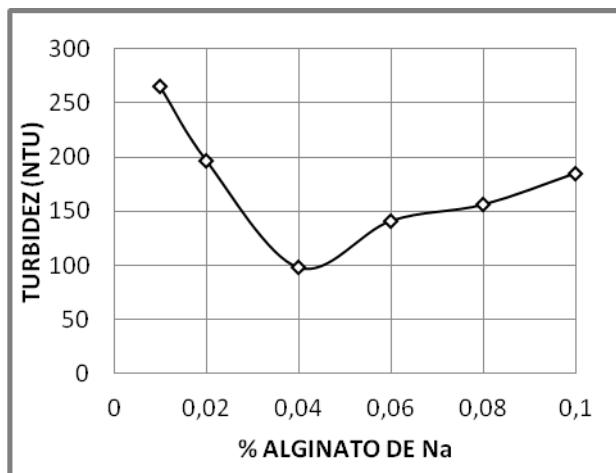


Figura 1. Turbidez de la suspensión coloidal en función de la concentración de alginato de sodio

En la Figura 2 se muestra la gráfica de la turbidez del sistema coloidal de AgI, que se encontraba a un pH = 6, en función de la concentración de sulfato de aluminio. De esta gráfica se deduce que la concentración óptima de sulfato de aluminio para producir la coagulación de suspensión coloidal AgI es 40 ppm.

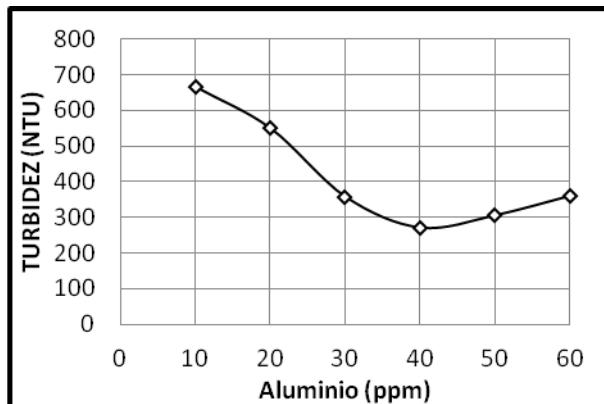


Figura 2. Turbidez de la suspensión coloidal de AgI en función de la concentración de los iones de Al³⁺

Proporción óptima del volumen de sulfato de aluminio y alginato de sodio en la coagulación de la suspensión coloidal de AgI. En los pasos anteriores se han determinado los parámetros óptimos de las soluciones coagulantes de sulfato de aluminio: concentración 40 ppm, pH = 4, volumen 50 mL y alginato de sodio: concentración 0,04%, volumen 50 mL y pH = 4,5, que

producen la coagulación y floculación de 600 mL de la suspensión coloidal de AgI, que se encuentra a pH 6. Teniendo esta información se puede examinar la acción mixta del sulfato de aluminio y alginato de sodio en la coagulación de esta suspensión coloidal. Los resultados de esta acción mixta se muestran en la Figura 3. De la gráfica de las medidas de turbidez versus el volumen de cada solución coagulante, que se ha agregado al sistema coloidal, se deduce que la proporción óptima de cada coagulante es 30 mL de sulfato de aluminio y 20 mL de alginato de sodio. En este caso, se alcanza el 98% de remoción de las partículas coloidales suspendidas.

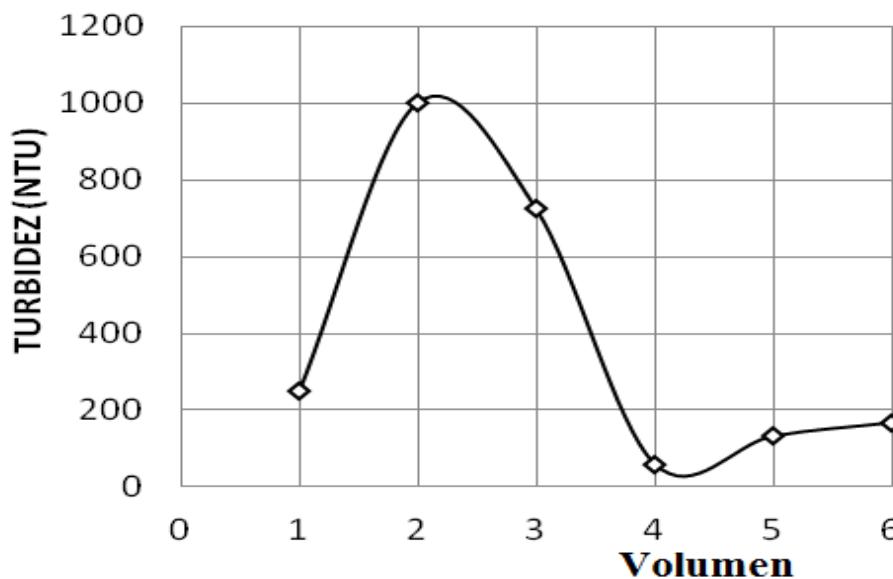


Figura 3. Relación entre el volumen de sulfato de aluminio y alginato de sodio en la coagulación de la suspensión de AgI. Cada punto en la gráfica representa el volumen empleado en mL de cada coagulante: 1 – (0, 50), 2 – (10, 40), 3 – (20, 30), 4 – (30, 20), 5 – (40, 10), 6 – (45, 5)

Cinética de la coagulación de la suspensión coloidal de AgI por la acción mixta de sulfato de aluminio y alginato de sodio. El estudio de la cinética del proceso de coagulación permite determinar el tiempo óptimo en que se produce la coagulación completa de la suspensión coloidal por acción de los coagulantes y floculantes. En el presente caso, el ion de Al^{3+} , por ser un ion polivalente, puede desestabilizar a la doble capa eléctrica debido a la fuerte capacidad de adsorción que poseen, a pesar de no ser en este caso un ion coagulador directamente, en cambio el ion sulfato de carga negativa es un ion coagulante y contribuye a la neutralización de la doble capa eléctrica de la partícula coloidal, de este modo ambos iones son importantes en el proceso de coagulación. El poli ion de alginato de carga negativa se une fácilmente a las partículas coloidales de carga positiva y también con los iones de Al^{3+} que desestabilizan a la doble capa eléctrica, de

esta manera se forman redes tridimensionales con las partículas coloidales, que conduce a un aumento de la masa de los coágulos, lo cual produce floculación rápida. En la Figura 4, se muestra como varía la turbidez de la suspensión de AgI en función del tiempo de coagulación; se deduce que la acción mixta del sulfato de aluminio y alginato de sodio en la coagulación de las partículas coloidales de AgI es rápida, pues culmina a los 6 minutos de haber empezado el proceso de coagulación.

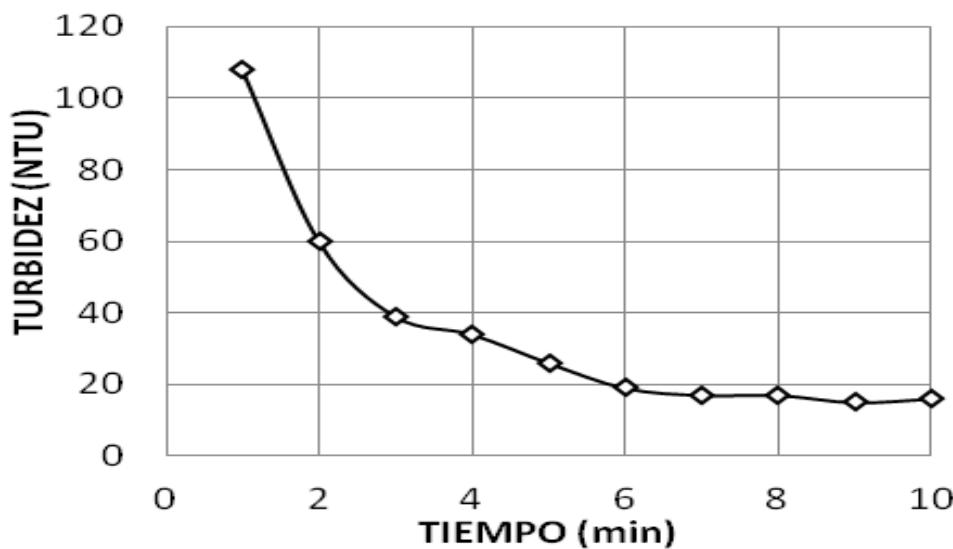


Figura 4. Turbidez de la suspensión coloidal AgI en función del tiempo, los parámetros iniciales fueron: 600 mL de la suspensión de AgI a pH = 6, se agregó 30 mL de una solución 40 ppm de Al^{3+} , y 20 mL de una solución 0,04% de alginato de sodio

CONCLUSIONES

Mediante el uso del método de *Test de Jarras* y medidas de turbidimetría se ha determinado que para producir la coagulación – floculación de 600 mL, a pH 6 de la suspensión coloidal de AgI de carga positiva, por acción de una solución de alginato de sodio, los parámetros óptimos son: concentración 0,04%, pH = 4, volumen óptimo 25 mL; para la solución de sulfato de aluminio los parámetros óptimos son: concentración 40 ppm, pH 4,5 y volumen 25 mL. Para la acción mixta de ambos coagulantes, considerando al sulfato de aluminio como coagulante y al alginato de sodio como floculante se tiene que el volumen de la solución de sulfato de aluminio fue 30 mL a la concentración de 40 ppm y volumen de la solución de alginato de sodio fue de 20 mL, a la concentración de 0,04%, siendo la remoción de partículas coloidales del 98%. Del estudio de la cinética de coagulación–floculación producida por ambos coagulantes en la suspensión coloidal de AgI, se ha determinado que este proceso es rápido y termina a los 6 min.

Agradecimiento. Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación y Posgrado de la UNMSM por el soporte financiero al proyecto C17071771 (2017) “Investigación de la separación selectiva de iones de metales pesados y colorantes de la industria textil de disolución acuosa por procesos de adsorción y coagulación con biopolímeros”

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Yu Zhou, Zhen Liang, Yanxin Wang. “Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminum sulfate”, *J. Desalination* 225(1–3), 301 (2008) <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.010>
- [2] Hassiba Zemmouri, Madani Drouiche, Amna Sayeh, Hakim Loumici, Nabil Mameri “Coagulation flocculation test of Keddara’s water dam using chitosan and sulfate aluminum”, *J. Procedia Engineering*, 33, 254 (2012) <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1202>.
- [3] Guo B, Yu H, Gao B, Rong H, Dong H, Ma D, Li R, Zhao S “Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate with cationic polyamidine as coagulant aid for kaolin – humic acid treatment”, *J. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 481, 476 (2015) <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.06.017>
- [4] Polizzi S, Pira E, Ferrara M, Buginani M, Papaleo A, Albera R, Palmi S “Neurotoxic effects of aluminum among foundry workers and Alzheimer’s disease” *J. Neurotoxicology* 23, 761 (2002)
- [5] Guibal E, Van Vooren M, Dempsey BA, Roussy J “A review of the use of chitosan for the removal of particulate and dissolved contaminants”, *Separation Science and Technology*, 41(11), 2487 (2006)
- [6] You L, Lu F, Li D, Qiao Z, Yin Y “Preparation and flocculation properties of cationic starch/chitosan crosslinking-copolymer”, *J. Hazard. Mater.*, 172, 38 (2009): <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.120>
- [7] Rojas-Reyna R., Schwarz S., Heinrich G., Petzold G., Schütze S., Bohrisch J. “Flocculation efficiency of modified water soluble chitosan versus commonly used commercial polyelectrolytes”. *Carboh. Polym.* 81, 317–322 (2010) <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.02.010>.
- [8] Wang JP, Yuan SJ, Wang Y, Yu HQ “Synthesis, characterization and application of a novel starch-based flocculant with high flocculation and dewatering properties”, *Water Research*, 47(8), 2643 (2013)
- [9] Liimatainen H, Sirvio J, Sundman O, Visanko M, Hormi O, Niinimaki J “Flocculation performance of a cationic biopolymer derived from a cellulosic source in mild aqueous solution”, *Bioresour. Technol.* 102, 9626 (2011) <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.099>.
- [10] Block J, Verfaillie A, Eyley S, Deschaume O, Bartic C, Muylaert K, Thielemans W “Cationic cellulose nanocrystals for flocculation of microalgae: effect of degree of substituting and crystallinity”, *J. Appl. Nano. Matter.*, 2, 3394 (2019): <https://doi.org/10.1021/acs.anm.9b00315>
- [11] Kanmani P, Aravind J, Kamaraj M, Sureshbabu P, Karthikeyan S “Environmental applications of chitosan and cellulosic biopolymers: A comprehensive outlook”, *J. Bioresource Technology*, 242, 295 (2017)
- [12] Rani P, Mishra S, Sen G “Microwave based synthesis of polymethyl methacrylate grafted sodium alginate: its application as flocculant”, *J. Carbohydr. Polym.*, 91, 686 (2013) <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.023>
- [13] Agbovi HK, Wilson LD “Flocculation optimization of orthophosphate with FeCl₃ and Alginate using the Box–Behnken response surface methodology”, *J. Ind. Eng. Chem. Res.*, 56, 3145 (2017) <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04765>
- [14] Zhao YX, Wang Y, Gao BY, Shon HK, Kim JH, Yue QY “Coagulation performance evaluation of sodium alginate used as coagulant aid with aluminum sulfate, iron chloride and titanium tetrachloride”, *J. Desalination*, 299, 79 (2012)
- [15] Yu YQ, Zhao C, Liu XS, Sui MY, Meng Y “Selective flocculation of pollutants in wastewater using pH responsive HM-alginate/chitosan complexes”, *J. Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5406 (2017)
- [16] Wu C, Wang Y, Gao B, Zhao Y, Yue Q “Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate using sodium alginate as coagulant aid for synthetic dying waste water treatment”, *J. Separation and Purification Technology*, 95, 180 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.05.009>