

Procesos continuos con microondas: Una revisión del estado en la industria alimentaria

Mónica Giovanna Gutiérrez-Cárdenas¹, Israel Martínez-Ramírez² y María Elena Sosa-Morales¹

¹ Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca.

²Departamento de Ingeniería Mecánica (Sistemas de Maquinado). División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato Campus Irapuato-Salamanca mg.gutierrezcardenas@ugto.mx; msosa@ugto.mx.

RESUMEN

Las microondas (MW) son un tipo de radiación que se encuentra dentro del espectro electromagnético. Son empleadas generalmente en procesos en la industria alimentaria como alternativa a los procesos térmicos tradicionales, debido a que su calentamiento es corto y daña en menor medida a los productos a procesar. Actualmente se utilizan a nivel doméstico y en la industria, sin embargo, la mayoría de los procesos en los que se emplean son por lotes o procesos totalmente cerrados. Los hornos continuos son mas eficientes y rentables. Los hornos de microondas funcionan con electricidad, la cual puede ser obtenida de fuentes renovables de energía como la solar, eólica o nuclear. La aplicación de MW en sistemas continuos ha representado un gran reto en el diseño y construcción de prototipos, dado a que la mayor problemática se encuentra en la alimentación del proceso. Los diseños a nivel laboratorio y planta piloto abrirán paso a el escalamiento de estos procesos a nivel industrial.

Palabras clave: microondas, proceso continuo.

ABSTRACT

Microwaves (MW) are a kind of radiation that is inside the electromagnetic spectrum. MW are generally used for processes in the food industry as an alternative to conventional thermal processes, because the process time is short, and they cause less damage to the food products. Currently, they are used domestically and in industry, however, most of the processes in which they are used are batch or totally closed processes. Continuous ovens are more efficient and profitable. Microwave ovens work with electricity, which can be obtained from renewable energy sources such as solar, wind or nuclear. The application of MW in continuous systems has represented a great challenge in the design and construction of prototypes, because that the main problem is in the feeding of the process. Laboratory and pilot plant designs will open the way to scaling up these processes at an industrial level.

Keywords: microwave, continuous process.

Área: Otros

Índice

1. Introducción
2. Microondas (MW)
3. Impacto ambiental
4. Aplicación
5. Propiedades dieléctricas (PD)
6. Sistemas en MW continuos
7. Diseño de equipos para procesos continuos con MW en la industria alimentaria.
8. Conclusión
9. Agradecimientos
10. Bibliografía

INTRODUCCIÓN

En la industria alimentaria se encuentran procesos en los cuales se han empleado diversas tecnologías las cuales ayudan a que los procesos sean más cortos y con menos daño en la matriz alimentaria, además de ser amigables con el medio ambiente, tal como calentamiento óhmico, infrarrojo, ondas de radiofrecuencia y las ondas de microondas (MW) (Cauvain, 2016; Zhu *et al.*, 2017). Aunque las MW ya son empleadas a nivel industrial como domésticos, para procesos continuos esta tecnología aún no se ha podido aplicar en todos los procesamientos alimentarios dado a su peculiar método de calentamiento y el amplio conocimiento que requiere si se quisiera adaptar esta tecnología a cualquier sistema (Reddy & Datta, 2019). Es por esto que el conocimiento de equipos continuos en donde ya se empleen MW abrirá paso a el diseño de nuevos procesos en donde todavía no se ha podido implementar esta tecnología.

1. Microondas (MW)

Debido a su principio, el calentamiento por MW se caracteriza por ser eficiente, interno y amigable con el medio ambiente, y como se mencionó anteriormente ha tenido amplias aplicaciones en el uso industrial y doméstico (Yolacaner *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2017). Las ventajas que ha tenido el procesamiento de microondas han orillado a los investigadores a investigar acerca de esta tecnología al ser un método prometedor de procesamiento en la industria alimentaria (Therdthai *et al.*, 2016; Alifaky *et al.*, 2017).

El calentamiento por radiación de MW se da gracias a que estas transmiten la energía directamente a las partículas del cuerpo. Las MW son una radiación electromagnética no ionizante de alta frecuencia que se encuentran entre 300 MHz y 300 GHz del espectro electromagnético (Kumar *et al.*, 2020); el campo electromagnético de estas ondas produce un movimiento giratorio en las moléculas dipolares presentes en los alimentos, lo que genera calor debido a la fricción, aunado a esto, las microondas también pueden generar calor debido a la interacción de partículas cargadas como la sal presentes en el material alimenticio, dando como resultado un calentamiento en el interior del cuerpo, lo que se le conoce como calentamiento volumétrico, y de este modo el tiempo de proceso se reduce significativamente, lo que implica un mayor rendimiento del proceso para las industrias (Menéndez y Moreno, 2017; Garg *et al.*, 2019).

2. Impacto ambiental.

En la industria alimentaria el procesamiento de los alimentos genera una gran demanda energética ya que en la mayoría de los procesos se requiere calor proveniente de vapor o aire, en donde la calefacción convencional es la principal fuente para estos procesos (El-Mashad & Pan, 2017). Las nuevas tecnologías han traído consigo ventajas no solo en la conservación de la materia prima, sino también en el impacto ambiental, ya que al reducir los tiempos de procesamiento se reduce significativamente el uso de energía, además de que en procesos de extracción se reduce el uso de solventes, lo cual da mayor rendimiento de recuperación y menor riesgo de contaminación ambiental (Ordoñez-Torres *et al.*, 2020).

La eficiencia económica con la implementación de MW en comparación con prensado de semillas para la producción de aceite aumenta incluso hasta un 11.5% (Bastron *et al.*, 2020). En procesos como hidrodestilación la asistencia de microondas (MAHD) ha reducido el consumo eléctrico y las emisiones de CO₂ en comparación con el proceso sin asistencia (HD), en donde HD obtuvo un consumo eléctrico de 1.360 kWh y MAHD de alrededor de 0.183 kWh, así también como la emisión de CO₂ la cual fue de 1.09 kg para HD mientras que para MAHD fue de 0.15 Kg aprox., según algunos estudios reportados (Drinić *et al.*, 2020).

3. Aplicación

Generalmente la aplicación de las MW en alimentos incluye procesos de secado, descongelado, esterilización, pasteurización, horneado, etc., en donde se proveen muchas ventajas como el ahorro de energía por su calentamiento volumétrico, reduciendo los tiempos de procesamiento y de operación, además de que mejoran la retención de los componentes de estos mismos, sin embargo, el calentamiento no uniforme y la distribución de la energía electromagnética son algunas de las desventajas que presenta el uso de esta tecnología (Chizoba *et al.*, 2017).

Si bien ya existen procedimientos en donde se apliquen las MW como los que se mencionan anteriormente, los procesos continuos siguen siendo escasos, ya que presentan problemáticas como mecanismos para alimentar automáticamente los productos a través de la cavidad y para dar solución ante esta problemática, se han optado por aditamentos como las bandas transportadoras que atraviesan la cavidad donde se procesa el material (Puangsuwan *et al.*, 2021).

La forma más fácil y rápida de construir o diseñar un sistema de MW de flujo continuo a escala laboratorio o planta piloto, es modificar y adaptar algunos sistemas ya existentes, tales como hornos domésticos, aparatos de microondas multimodo y monomodo, desarrollados principalmente para uno por lotes (Estel *et al.*, 2021). Generalmente para el diseño de equipos continuos de MW es necesario conocer ciertas características del material que se quiere procesar, tal y como las propiedades dieléctricas del mismo para poder así determinar variables como las dimensiones de la cavidad y el comportamiento del campo electromagnético dentro de ella (Puangsuwan *et al.*, 2021).

4. Propiedades dieléctricas (PD)

Los materiales que tienen una interacción con la radiación de las microondas para producir calor son denominados dieléctricos o absorbentes de microondas y para describir la capacidad de este material para ser calentado en presencia del campo de microondas se da por su tangente de pérdida dieléctrica $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$, la cual se compone de dos parámetros: ϵ' , que es la constante dieléctrica o permitividad real, que se relaciona con la tendencia de un material a polarizarse cuando se somete a un campo eléctrico, tratando de contrarrestarlo, y por otro lado, ϵ'' , que es el factor de pérdida dieléctrica o permitividad imaginaria que se relaciona con la capacidad del material para disipar la energía en forma de calor, en este sentido, un material dieléctrico tendrá un mejor calentamiento ante la radiación de microondas cuando su factor de pérdida eléctrica (ϵ'') sea mayor (Menéndez & Moreno, 2017).

Las PD afectan también el tamaño del equipo esto dado a que a medida que progresa una carga de trabajo en el calentamiento dieléctrico, su amplitud disminuye debido a la absorción de energía como calor en el material (Binner *et al.*, 2014) aunado a esto, los alimentos son malos conductores eléctricos dado a que tienen la capacidad de almacenar y disipar energía eléctrica cuando son expuestos a un campo magnético (Sosa-Morales *et al.*, 2010). Esta atenuación se expresa de manera cuantitativa por la profundidad de penetración, que se define como la profundidad en el material en el que el flujo de potencia ha caído $1/e$ de su valor superficial y se representa por medio de $d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 - 1 \right]}}$, donde: c es la velocidad de la luz en el

espacio libre (3×10^8 m x s⁻¹), f : es la frecuencia (Hz), ϵ' : constante dieléctrica y ϵ'' es el factor de pérdida dieléctrica. Esto se ve implicado en que las microondas no pueden penetrar mucho en los materiales que absorben fuertemente las microondas, y esto limita las dimensiones del reactor (Binner *et al.*, 2014; Sosa-Morales *et al.*, 2010).

5. Sistemas de MW continuos

El uso de las MW en el ámbito industrial como en el doméstico está autorizado sin necesidad de adquirir alguna licencia especial, sin embargo, existen dependencias que regulan las frecuencias a las que se pueden utilizar este tipo de onda (Menéndez & Moreno, 2017). Dentro de los estándares internacionales tales como el Comité Internacional sobre Seguridad Electromagnética (ICES) del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y el Comité Europeo de Estandarización Electrotécnica (CENELEC), se han establecido los límites de emisión de los productos de microondas de 50 W/m² en cualquier punto alejado a 5 cm de las superficies externas del horno (OMS, 2005). Así como la Federal Comision Communication (FCC) ha limitado las operaciones de los sistemas que se manejen con frecuencias de 915 MHz en aplicaciones industriales y 2450 MHz para uso doméstico (FCC, 2019).

Los sistemas de MW continuos consisten generalmente de una fuente alimentadora de poder (transformador), suministro de energía de MW (magnetron), guías de onda, cavidad de aplicación y supresores de MW (Atuonwu & Tassou, 2018)., en donde cada parte cumple una función en específico, las cuales se describen a continuación:

5.1. Magnetron. Las ondas MW con las que funcionan estos dispositivos son producidas por el magnetron, el cual recibe la energía eléctrica y la transforma a energía electromagnética (Prado *et al.*, 2017).

5.2. Guías de onda. Encargadas de emitir la radiación a una primera región de la cavidad de calentamiento. Son las líneas de transmisión de la potencia de las microondas desde el generador a la carga, frecuentemente utilizadas de forma rectangular. (De- Titta & García-Polanco, 2019).

5.3. Cavidad. Es aquí donde se lanza la señal de microondas y en donde se introduce la muestra a calentar. Una vez lanzada la onda a la cavidad sufrirá múltiples reflejos. Se clasifican en dos categorías principales: resonantes monomodo y multimodo. Deben de estar hechas de metales no magnéticos de alta conductividad eléctrica y de baja resistividad eléctrica, de materiales como cobre, aluminio y latón, sin embargo (Radoiu, 2020).

5.4. Supresores de microondas. Con el fin de evitar fugas en el sistema continuo, se utilizan supresores de ondas que son capaces de suprimir las fugas de microondas y la permeación del material (Jiang *et al.*, 2017). Existen de tipo *choke* y tipo *stubs* (Boonthum *et al.*, 2019)

5.5. Cintas transportadoras. Las cintas transportadoras que están en contacto con las microondas son preferiblemente hechas con materiales dieléctricos delgados y de preferencia un material dieléctrico de baja perdida, por ejemplo, la tela o tela de goma (Lamb, 1965).

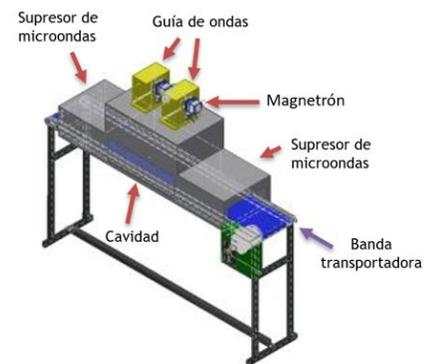


Figura 1. Componentes principales de un sistema de microondas continuo.

6. Diseño de equipos para procesos continuos con MW en la Industria alimentaria

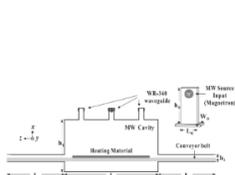
Como se mencionó anteriormente, los procesos continuos en donde se utilice la tecnología de MW siguen siendo escasos, sin embargo, las investigaciones han seguido para dar paso a los procesos continuos, como los que se muestran a continuación.

6.1. Extracción. Métodos de extracción han sido asistidos con microondas, algunos estudios han empleado esta tecnología por su capacidad de calentar rápidamente las corrientes del proceso, lo cual permite diseñar un proceso continuo, por lo tanto una vez realizado los experimentos exploratorios por

lotes a pequeña escala para la extracción de pectina pilosa con la asistencia de MW los resultados obtenidos se utilizaron para informar en diseño y desarrollo de un sistema de extracción de pectina de flujo continuo demostrando así la viabilidad de utilizar un tratamiento térmico asistido por microondas de flujo continuo escalable para la extracción utilizando sólo agua como medio de extracción (Arrutia *et al.*, 2020).

6.2. Pasteurización. La pasteurización con MW es considerada una tecnología térmica alterna a las técnicas convencionales. El calentamiento con MW tiene una serie de ventajas cuantitativas y cualitativas sobre las técnicas de calentamiento convencionales, en donde su principal ventaja es el de generar calor dentro del propio producto, por lo que se puede calentar en menor tiempo e inclusive con mayor difusión de temperatura lo que conlleva comúnmente a un mayor rendimiento, tasa de producción y mejora de la calidad del producto (Klug *et al.*, 2018).

En la **Figura 2** se pueden mostrar algunos diseños de prototipos realizados para diferentes procesos de la industria alimentaria.

Figura 2. Diseño de sistemas continuos con asistencia de MW en la industria alimentaria.					
Proceso	Producto	Condiciones del diseño	Condiciones proceso	Esquema	Referencia
Prototipo para pretratamiento o para inhibición de la enzima lipasa	Aceite de palma	Tamaño de cavidad: 41 cm ancho, 18 cm de altura y 61 cm de longitud. Alimentación: banda transportadora Capacidad: 60 kg /h Magnetrones: 4 (800 W y 2450 MHz)	Temperatura: 70°C Tiempo: 120 s		Puangsuwan <i>et al.</i> , (2021)
Sistema escala piloto de descongelado continuo	Descongelado de surimi	Magnetrones de 915 MHz Guías de ondas de 24.7 y 12.3 cm ² Alimentación por banda transportadora	Tiempo de proceso: 160 s Potencia: 5 kW Velocidad de transporte: 0.0125 m/s		Zhang <i>et al.</i> , (2019)
Secador continuo de microondas con controlador de potencia	Agua	Dimensiones de cavidad de 100 cm de largo por 80 cm de alto y 120 cm de ancho Guía de ondas rectangulares (12). Magnetrones de 2450 MHz. Alimentación por banda transportadora	Tiempo 15 min (intermitente de 5 en 5 min) Potencia de 500 W y 750 W		Bae <i>et al.</i> , (2017)

CONCLUSIÓN

El empleo de MW en sistemas continuos representa un reto para los desarrollos de nuevos equipos y prototipos por su amplio conocimiento tanto del proceso como de la materia prima que se quiera procesar. Dentro de la industria alimentaria, es necesario conducir al empleo de nuevas tecnologías con el fin de reducir la contaminación que existe por el uso de fuentes de energía convencionales, además de que la aplicación de estas tecnologías en los procesamientos alimenticios tiene múltiples beneficios, desde la menor afectación al producto, como los tiempos cortos de proceso, aunado a que son tecnologías que se prestan para usar energía amigable con el medio ambiente, sin mencionar que son fáciles de manejar y representan menor riesgo para el operador. Gracias a los nuevos diseños y a la construcción de estos prototipos se podrá obtener la información necesaria para su posterior escalamiento a nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACyT por la beca otorgada para los estudios de Maestría de M. G. Gutiérrez Cardenas y a la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el apoyo para el proyecto CIIC 030/2021.

BIBLIOGRAFÍA

- Alifakı, Y. Ö., & Şakıyan, Ö. (2017). Dielectric properties, optimum formulation and microwave baking conditions of chickpea cakes. *Journal of food science and technology*, 54(4), 944-953.
- Arrutia, F., Adam, M., Calvo-Carrascal, M. Á., Mao, Y., & Binner, E. (2020). Development of a continuous-flow system for microwave-assisted extraction of pectin-derived oligosaccharides from food waste. *Chemical Engineering Journal*, 395 (1), 2-11.
- Atuonwu, J. C., & Tassou, S. A. (2018). *Quality assurance in microwave food processing and the enabling potentials of solid-state power generators: A review. Journal of Food Engineering*, 234 (1), 1–15.
- Bastron, A. V., Filimonova, N. G., Meshcheryakov, A. V., Mikheeva, N. B., & Ermakova, I. N. (2020). Technology of microwave treatment of cameline seeds and its economic efficiency. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 241 (2), 2-4.
- Binner, E., Mediero-Munoyerro, M., Huddle, T., Kingman, S., Dodds, C., Dimitrakis, G., ... y Lester, E. (2014). Factors affecting the microwave cooking of coals and the implications on microwave cavity design. *Fuel Trocressing technology*, 125 (1), 8-17.
- Boonthum, D., Chanprateep, S., Ruttanapun, C., & Nisoa, M. (2019). Development of high-temperature multi-magnetron microwave furnace for material processing. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 41(3).
- Cauvain, S. (2016). *Technology of Breadmaking. Switzerland: Springer International 3e*, 163.
- Chizoba Ekezie, F.-G., Sun, D.-W., Han, Z., & Cheng, J.-H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67 (1), 58–69.
- De Titta, E., Dore, G., y Garcia-Polanco, N. R. (2019). *Waveguide for microwave ovens with multiple feeding ports rf power control system and method thereof*. U.S. Patent Application No 16/307,107, 25 Jul. 2019.

- Drinić, Z., Pljevljakušić, D., Živković, J., Bigović, D., & Šavikin, K. (2020). Microwave-assisted extraction of *O. vulgare* L. spp. *hirtum* essential oil: Comparison with conventional hydro-distillation. *Food and Bioproducts Processing*, 120 (1), 158-165.
- Menéndez, J.A., Moreno, A.H. (Eds.). (2017). Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas. Latacunga, Ecuador: Editorial Universidad Técnica de Cotopaxi, Primera Edición, pp 315.
- Gaber, M. A. F. M., Knoerzer, K., Mansour, M. P., Trujillo, F. J., Juliano, P., & Shrestha, P. (2020). Improved canola oil expeller extraction using a pilot-scale continuous flow microwave system for pre-treatment of seeds and flaked seeds. *Journal of Food Engineering*, 284(1), 1-11.
- Garg, A., Malafrente, L., y Windhab, E. J. (2019). Baking kinetics of laminated dough using convective and microwave heating. *Food and Bioproducts Processing*, 115 (1), 59-67.
- El-Mashad, H. M., & Pan, Z. (2017). Application of induction heating in food processing and cooking. *Food Engineering Reviews*, 9(2), 82-90.
- Estel, L., Poux, M., Benamara, N., & Polaert, I. (2017). Continuous flow-microwave reactor: Where are we?. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 113 (1), 56-64.
- Federal Communications Commission FCC (2019) . Point-to-Point Microwave. Publicado 26 de septiembre de 2019. Obtenido el 13 de mayo de 2021. <https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/broadband-division/point-point-microwave>
- Jiang, H., Liu, Z., y Wang, S. (2017). *Microwave processing: Effects and impacts on food components. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–14.
- Klug, T. V., Collado, E., Martínez-Sánchez, A., Gómez, P. A., Aguayo, E., Otón, M., ... & Artés-Hernandez, F. (2018). Innovative quality improvement by continuous microwave processing of a faba beans pesto sauce. *Food and bioprocess technology*, 11(3), 561-571.
- Kumar, S. R., Sadiq, M. B., & Anal, A. K. (2020). Comparative study of physicochemical and functional properties of pan and microwave cooked underutilized millets (proso and little). *LWT-Food Science and Technology*, 128 (1), 1-8.
- Lamb, J. T. (1965). *U.S. Conveyor microwave oven Patent No. 3,177,333*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Ordoñez-Torres, A., Torres-León, C., Hernández-Almanza, A., Flores-Guía, T., Luque-Contreras, D., Aguilar, C. N., & Ascacio-Valdés, J. (2020). Ultrasound-microwave-assisted extraction of polyphenolic compounds from Mexican “Ataulfo” mango peels: Antioxidant potential and identification by HPLC/ESI/MS. *Phytochemical Analysis*. 2020 (1), 1-8.
- Organización Mundial de la Salud OMS (2005). Campos electromagnéticos y salud pública: Hornos microondas. Hoja informativa. Febrero de 2005. Recuperado 13 de mayo de 2021. https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/info_microwaves/es/
- Prado, A. O. G., Arteaga, S. C., Argaiz, P. E., Alberto, G. A. G., y Alicia, Z. P. (2017) Física en la Cocina. *investigación experimental. Memoria de Congreso*. México, D.F.

- Puangsuwan, K., Wongsopanakul, K., Tongurai, C., Channumsin, S., Sreesawet, S., & Chongcheawchamnan, M. (2021). Pretreatment of Palm Fruit by Using a Puangsuwan, K., Wongsopanakul, K., Tongurai, C., Channumsin, S., Sreesawet, S., & Chongcheawchamnan, M. (2021). Pretreatment of Palm Fruit by Using a Conveyor Belt Microwave Prototype. *Engineering Journal*, 25(1), 33-41.
- Radoiu, M. (2020). Microwave drying process scale-up. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 155(1), 1-11.
- Reddy, R. S., Arepally, D., y Datta, A. K. (2019). Estimation of heat flux in bread baking by Inverse problem. *Journal of Food Engineering*,(271 (1), 1-11.
- Sosa-Morales, M. E., Valerio-Junco, L., López-Malo, A., & García, H. S. (2010). Dielectric properties of foods: reported data in the 21st century and their potential applications. *LWT-Food Science and Technology*, 43(8), 1169-1179.
- Therdthai, N., Tanvarakom, T., Ritthiruangdej, P., & Zhou, W. (2016). Effect of microwave assisted baking on quality of rice flour bread. *Journal of Food Quality*, 39(4), 245-254.
- Tang, J., Hong, Y. K., Inanoglu, S., & Liu, F. (2018). Microwave pasteurization for ready-to-eat meals. *Current Opinion in Food Science*, 23(1), 133-141.
- Yolacaner, E. T., Sumnu, G., & Sahin, S. (2017). Microwave-assisted baking. *The Microwave Processing of Foods*, 117-141.
- Zhang, R., Wang, Y., Wang, X., y Luan, D. (2019). Study of heating characteristics for a continuous 915 MHz pilot scale microwave thawing system. *Food Control*, 104, 105-114.
- Zhou, J., Yang, X., Chu, Y., Li, X., y Yuan, J. (2020). A novel algorithm approach for rapid simulated microwave heating of food moving on a conveyor belt. *Journal of Food Engineering*, 282 (110029), 1-15.
- Zhu, H., Ye, J., Gulati, T., Yang, Y., Liao, Y., Yang, Y., & Huang, K. (2017). Dynamic analysis of continuous-flow microwave reactor with a screw propeller. *Applied Thermal Engineering*, 123(1), 1456-1461.