



Artikel Review : Efektifitas *Ultrasound-Assisted Freezing* terhadap Laju Pembekuan *Frozen Food*

Abang Raihan Apriansyah^{1*}, Anasthasya Wafa Resty², Andini Dahayu Ardiningrum³
^{1,2,3} Universitas Tanjungpura, Indonesia

Alamat: Jl. Profesor Dokter H. Hadari Nawawi, Bansir Laut, Kec. Pontianak Tenggara, Kota Pontianak. Kalimantan Barat

Korespondensi penulis: c1061221091@student.untan.ac.id

Abstract. Freezing is a widely used preservation method to extend the shelf life of food, yet conventional freezing often produces large ice crystals that damage tissue structures and reduce product quality. This study aims to evaluate the effectiveness of ultrasound-assisted freezing technology in improving the quality of frozen food. A literature review method was employed, focusing on scientific publications from 2015 to 2025. The results show that ultrasound application, particularly High-Intensity Ultrasound (HIUS), can accelerate the freezing rate by enhancing ice nucleation and improving heat transfer efficiency. The formation of smaller and more uniformly distributed ice crystals helps preserve the structural integrity of food and reduces water loss during thawing. The effectiveness of this technology varies depending on the type of food material, temperature, duration, and ultrasound intensity. In animal-based products, it helps maintain texture and color, while in plant-based materials, it preserves moisture content and firmness. However, excessively high intensity may pose a risk of protein denaturation, especially in sensitive materials such as fish. These findings suggest that ultrasound-assisted freezing is a promising innovative solution to improve both the quality and efficiency of the food freezing process.

Keywords: ultrasound freezing, HIUS, frozen food quality, ice crystals, freezing rate enhancement

Abstrak. Pembekuan merupakan metode pengawetan yang banyak digunakan untuk memperpanjang masa simpan pangan, namun pembekuan konvensional sering menghasilkan kristal es besar yang merusak jaringan dan menurunkan kualitas produk. Kajian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas teknologi pembekuan dengan bantuan ultrasound dalam meningkatkan kualitas makanan beku. Metode yang digunakan adalah studi literatur terhadap publikasi ilmiah dari tahun 2015 hingga 2025. Hasil menunjukkan bahwa aplikasi ultrasound, terutama High-Intensity Ultrasound (HIUS), mampu mempercepat laju pembekuan melalui peningkatan nukleasi es dan efisiensi perpindahan panas. Pembentukan kristal es yang kecil dan merata menjaga integritas struktur jaringan pangan serta mengurangi kehilangan air saat pencairan. Efektivitas teknologi ini bervariasi tergantung pada jenis bahan pangan, suhu, durasi, dan intensitas ultrasound. Pada bahan hewani, teknologi ini mampu mempertahankan tekstur dan warna, sementara pada bahan nabati dapat menjaga kandungan air dan kekerasan jaringan. Namun, intensitas yang terlalu tinggi dapat menimbulkan risiko kerusakan protein, terutama pada bahan sensitif seperti ikan. Temuan ini menunjukkan bahwa ultrasound-assisted freezing berpotensi menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan mutu dan efisiensi proses pembekuan pangan.

Kata kunci: pembekuan ultrasonik, HIUS, kualitas pangan beku, kristal es, percepatan pembekuan

1. LATAR BELAKANG

Pembekuan merupakan salah satu metode efektif untuk mengawetkan produk pangan (Sukusno *et al.*, 2018). Proses pembekuan dapat mengurangi aktivitas enzim dan air pada pangan sehingga dapat memperpanjang masa simpan produk pangan untuk waktu yang lama. Pada proses pembekuan, suhu makanan diturunkan hingga di bawah titik beku air, biasanya sekitar -18°C atau lebih rendah. Pada suhu ini, aktivitas mikroorganisme yang menyebabkan pembusukan akan terhambat secara drastis, dan reaksi enzimatik dalam bahan makanan

melambat, sehingga tekstur, rasa, warna, serta nilai gizi makanan tetap terjaga (Alizadeh *et al.*, 2007).

Meskipun pembekuan merupakan metode pengawetan makanan yang sangat efektif, metode pembekuan konvensional seperti air *blast freezing*, *direct-contact freezing* dan *immersion freezing* biasanya memiliki laju pembekuan yang rendah. Pembekuan dengan metode konvensional menyebabkan terbentuknya kristal es berukuran besar, yang menyebabkan kerusakan pada struktur sel internal sampel pangan (Luo *et al.*, 2018).

Keterbatasan ini telah banyak dibahas dalam literatur ilmiah. Menurut Ying *et al.* (2021), proses pembekuan air mengakibatkan terbentuknya kristal es yang meningkatkan volume hingga 10%. Pembentukan kristal es ini dapat merusak jaringan dan sel udang, yang menyebabkan pecahnya membran sel, kerusakan pada jaringan, serta kehilangan cairan saat pencairan berlangsung. Ketika membran sel telah rusak, proses oksidasi lipid bisa terjadi sebagai akibat dari pelepasan oksidase dan ion logam. Selain itu, air yang tidak membeku sepenuhnya menyebabkan peningkatan konsentrasi ion dan pH, yang mengarah pada denaturasi protein. Air yang terikat pada protein juga dapat terlepas, yang menyebabkan agregasi dan denaturasi lebih lanjut. Secara keseluruhan, pembentukan kristal es termasuk ukuran dan distribusinya memiliki dampak signifikan terhadap kualitas makanan. Kristal es yang besar dan tidak teratur dapat merusak jaringan otot dan memengaruhi struktur serta fungsi protein otot, sedangkan kristal es yang kecil dan terdistribusi merata cenderung lebih baik dalam mempertahankan struktur protein.

Menurut Soltani Firouz *et al.* (2022) dalam metode konvensional, masalah pembekuan terjadi ketika laju pembekuan rendah, dalam hal ini kristal es berukuran besar dan memiliki tepi tajam, yang biasanya terbentuk di ruang antar sel dan menyebabkan kerusakan sel, akhirnya, hal ini menyebabkan penurunan kualitas produk. Selain itu, fluktuasi suhu selama penyimpanan dan lama penyimpanan menyebabkan terbentuknya kristal yang tidak beraturan, sehingga mengakibatkan penurunan kualitas daging. Pembekuan yang lambat dan pembentukan kristal es yang besar dapat menyebabkan kerusakan serius pada jaringan otot daging, yang berdampak buruk pada kualitas daging karena hilangnya air dalam daging selama pencairan. Kerusakan daging akibat pembekuan merupakan masalah kritis, yang meliputi gangguan struktur jaringan, perubahan tekanan osmotik dan sifat fungsional, serta terurainya struktur protein.

Teknik pembekuan baru seperti pembekuan dengan bantuan ultrasonik telah dikembangkan untuk mengatur proses nukleasi es dan mempercepat laju pembekuan dengan tujuan untuk membentuk kristal es kecil dan seragam di ekstraseluler dan intraseluler dalam

makanan beku untuk pengawetan kualitas makanan yang lebih baik. Dalam beberapa tahun terakhir, karena efek fisikokimia yang luar biasa yang dihasilkan oleh daya ultrasonik selama transmisi media, daya ultrasonik diterapkan secara luas dalam pemrosesan makanan untuk pengeringan, pembekuan, homogenisasi, degassing, sterilisasi, dan sebagainya. Dilaporkan bahwa daya ultrasonik memiliki dampak positif pada proses pembekuan makanan karena percepatan proses nukleasi dan peningkatan efisiensi perpindahan panas. Ukuran dan distribusi kristal es memainkan peran penting dalam kualitas makanan beku, dan daya ultrasonik mampu mengurangi ukuran kristal es untuk membentuk distribusi kristal es yang lebih seragam selama proses pembekuan (Zhu *et al.*, 2020).

Ultrasound Freezing (UF) merupakan teknik pembekuan cepat baru yang dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir. Penelitian telah menunjukkan bahwa teknik ini dapat mempercepat proses pembekuan secara efektif, mengurangi ukuran kristal es, dan meningkatkan kualitas makanan beku. Mekanismenya mungkin sebagai berikut: Di satu sisi, gelombang ultrasonik dapat menghasilkan gelembung kavitasi, yang dapat digunakan sebagai inti kristal untuk mendorong pembentukan kristal es. Di sisi lain, pancaran mikro yang dihasilkan oleh gelombang ultrasonik dapat memecah kristal es besar menjadi kristal es kecil, yang dapat digunakan sebagai inti kristal untuk mendorong rekristalisasi kristal es (Peña-Gonzalez *et al.*, 2019). Saat ini, UF telah digunakan dalam banyak makanan beku termasuk sayuran, buah-buahan, adonan, dan produk daging (Xiong *et al.*, 2020).

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian pustaka (*literature study*), yang bertujuan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menyintesis informasi dari berbagai literatur yang relevan mengenai Efektifitas *Ultrasound-Assisted Freezing* untuk Meningkatkan Kualitas *Frozen Food*. Referensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah semua artikel primer dengan kriteria seleksi data tahun 2015-2025. Kajian pustaka dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut: pemilihan sumber literatur, proses pencarian literatur, pemilihan literatur, analisis literatur, sintesis dan penyajian hasil.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Jenis Ultrasound

Ultrasonografi merupakan teknologi inovatif yang didasarkan pada penerapan gelombang mekanik pada frekuensi 20 kHz hingga 10 MHz. Penerapan Ultrasound dalam teknologi pangan dan pengolahan makanan diklasifikasikan berdasarkan intensitas dan

frekuensinya yang dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *Low-Intensity Ultrasound* (LIUS) dan *High-Intensity Ultrasound* (HIUS) (Gallo *et al*, 2018)

Low-Intensity Ultrasound (LIUS) memiliki frekuensi tinggi, umumnya dalam rentang 100 kHz hingga 10 MHz, dengan intensitas energi kurang dari 1 W/cm². Teknologi ini digunakan untuk tujuan non-destruktif, seperti pemantauan kualitas pangan, analisis tekstur, deteksi cacat internal, dan pengukuran komposisi makanan tanpa merusak struktur alaminya (Firouz *et al*, 2022). Prinsip kerja LIUS terutama melibatkan perubahan fisik kecil pada material melalui getaran mekanis tanpa menyebabkan kavitasi. Karena sifatnya yang lembut dan akurat, LIUS banyak diterapkan pada proses-proses seperti pengukuran kadar alkohol dalam fermentasi, analisa kadar gula dalam jus buah, hingga kontrol tingkat kematangan buah dan sayuran. Selain itu, LIUS juga berperan penting dalam evaluasi proses fermentasi dan pemantauan mikrostruktur makanan secara in-line di industri.

High-Intensity Ultrasound (HIUS) beroperasi pada frekuensi lebih rendah, yakni sekitar 20 kHz hingga 100 kHz, tetapi dengan intensitas energi yang jauh lebih tinggi, yaitu lebih dari 1 W/cm². HIUS menghasilkan efek kavitasi akustik yang intens, di mana gelembung gas di dalam media cair mengalami pembentukan, pertumbuhan, dan kolaps, menciptakan kondisi tekanan dan suhu ekstrem dalam skala mikro. Efek ini menghasilkan *mikrostreaming*, *shockwave*, serta pembentukan radikal bebas seperti radikal hidroksil (-OH), yang semuanya dapat digunakan untuk mempercepat reaksi fisik dan kimia. HIUS secara spesifik diaplikasikan dalam berbagai proses aktif seperti *freezing*, *thawing*, *cooking*, fermentasi, ekstraksi bioaktif, dan tenderisasi daging (Dolatowski *et al*, 2007 dalam Firouz *et al*, 2022). Dalam pembekuan pangan, HIUS mempercepat pembentukan kristal es kecil melalui peningkatan laju nukleasi, sehingga menjaga integritas jaringan pangan dan meningkatkan kualitas produk akhir. Namun, karena efek energi tinggi ini, HIUS juga perlu dikontrol dengan baik untuk mencegah efek samping seperti peningkatan oksidasi lipid dan kerusakan protein

Prinsip Kerja Ultrasound

1. Efek terhadap Struktur dan Mikrostruktur Pengurangan ukuran kristal es.

Dalam mekanisme *High-Intensity Ultrasound-Assisted Freezing* (HIUS) proses pembekuan dapat dipercepat dengan memicu inisiasi nukleasi serta meningkatkan perpindahan panas dan massa (Tao *et al*, 2015) Proses nukleasi akibat HIUS ini terjadi dalam dua tahap utama: nukleasi primer dan nukleasi sekunder

Pada tahap nukleasi primer, proses ini dimulai ketika suhu mencapai titik nukleasi, yaitu suhu di bawah titik beku normal. Pada fase ini, sejumlah besar panas laten dilepaskan. Secara

luas dipercaya bahwa kondisi ekstrem (seperti tekanan tinggi) yang dihasilkan oleh HIUS membantu menurunkan tingkat supercooling, sehingga mempercepat terjadinya nukleasi (Kiani *et al.*, 2011 dalam Fu *et al.*, 2020). Selain itu, gelembung kavitasi yang terbentuk akibat HIUS juga bertindak sebagai inti untuk pembentukan kristal es ketika ukurannya mencapai ambang kritis. Gerakan dari gelembung kavitasi stabil ini menghasilkan aliran mikro dan pusaran kecil, yang membantu mempercepat perpindahan panas dan massa, serta memperlancar proses nukleasi.

Pada tahap nukleasi sekunder, yang terjadi berdasarkan keberadaan kristal es yang sudah ada, iradiasi HIUS dapat memecah struktur dendritik dari es menjadi banyak fragmen kecil. Ini disebabkan oleh runtuhnya gelembung kavitasi dan gaya geser dari aliran mikro, yang menghasilkan lebih banyak titik nukleasi baru. Runtuh dan gerakan gelembung kavitasi ini juga mengubah dinamika fluida dan meningkatkan koefisien perpindahan panas dan massa

2. Efek terhadap Laju Pembekuan.

Penerapan teknologi *high-intensity ultrasound* (HIUS) dalam proses pembekuan makanan secara spesifik berperan dalam meningkatkan laju pembekuan melalui mekanisme percepatan perpindahan panas dan promosi pembentukan inti kristal es. Ultrasound menghasilkan fenomena kavitasi, di mana gelembung gas terbentuk dan kolaps dalam medium cair, menciptakan *mikrostreaming* serta *shockwave* yang mempercepat aliran fluida di sekitar permukaan makanan (Gallo *et al.*, 2018; Soltani Firouz *et al.*, 2022). *Mikrostreaming* ini mengganggu lapisan batas termal yang biasanya menghambat laju transfer panas, sehingga panas dari makanan dapat lebih cepat dipindahkan ke medium pendingin (Gallo *et al.*, 2018).

Selain itu, kolaps gelembung kavitasi menyebabkan tekanan lokal yang sangat tinggi, meningkatkan derajat *supercooling* dan mempercepat nukleasi es, yakni fase awal pembentukan kristal es (Soltani Firouz *et al.*, 2022). Dengan meningkatnya jumlah pusat nukleasi, es terbentuk lebih cepat dan dalam ukuran yang lebih kecil serta terdistribusi lebih seragam. Akibatnya, waktu yang dibutuhkan untuk fase transisi dari air ke es yang dikenal sebagai fase kritis dalam pembekuan menjadi jauh lebih pendek (Gallo *et al.*, 2018). Studi menunjukkan bahwa aplikasi HIUS pada saat fase transisi ini dapat mengurangi waktu pembekuan hingga 6–8 kali dibandingkan metode pembekuan konvensional (Soltani Firouz *et al.*, 2022). Selain mempercepat pembekuan, penggunaan *ultrasound* juga membantu menghindari pembentukan kristal es besar yang bisa merusak struktur jaringan makanan.

Penerapan Teknologi *Ultrasound Assisted Freezing*

Tabel 1

Peneliti	Jenis Bahan	Waktu paparan dan daya ultrasound	Suhu Pembekuan (°C)	Efek terhadap Laju Pembekuan	Hasil
Zhu et al. (2018)	Sayuran padat	5 – 10 Menit 20 khz / 200 w	-25°C	Mengurangi waktu pembekuan hingga 20–30%	Struktur sel lebih terjaga, penurunan kehilangan air selama pencairan
Zhang et al. (2020)	Dada ayam	10 – 15 Menit 25 khz / 300 w	-18°C	Percepatan pembekuan hingga 38.2%	Mengurangi pembentukan kristal es besar, meningkatkan tekstur dan retensi warna
Tian et al. (2020)	Lobak	10 Menit 22 khz / 175 w	-30°C	Fase transisi lebih cepat 29%;	Kualitas mikrostruktur lebih baik, mempertahankan kekerasan dan kandungan air
Ma et al. (2021)	Ikan karper	6 – 10 Menit 30 khz / 350 w	-20°C	Pengurangan waktu pembekuan hingga 29.71%	Meningkatkan keutuhan daging, tetapi daya tinggi berisiko merusak protein sensitive

Teknologi *ultrasound-assisted freezing* (UAF) menunjukkan kinerja pembekuan yang sangat bergantung pada kombinasi antara jenis bahan, waktu dan daya ultrasound, serta suhu pembekuan. Data dari Tabel 1 memperlihatkan pengaruh parameter-parameter tersebut terhadap efisiensi pembekuan dan mutu akhir produk. Pada sayuran padat seperti wortel, studi oleh Zhu et al. (2018) menunjukkan bahwa penggunaan ultrasound dengan daya 200 W selama 5–10 menit pada suhu -25°C mampu mengurangi waktu pembekuan sebesar 20–30%. Efek kavitasi pada intensitas ini cukup untuk mempercepat nukleasi es tanpa merusak struktur sel. Hasil akhir berupa struktur sel yang lebih terjaga dan penurunan kehilangan air saat pencairan dikarenakan pembekuan cepat dengan UAF mempertahankan lebih banyak air dalam jaringan tilapia dibandingkan metode konvensional oleh (Liu et al. 2019),

Studi Zhang et al. (2020) pada dada ayam, bahan hewani dengan serat otot padat, menunjukkan bahwa UAF selama 10–15 menit dengan daya 300 W dan suhu -18°C menghasilkan percepatan pembekuan hingga 38,2%, serta penurunan pembentukan kristal es

besar. Penemuan ini diperkuat oleh hasil Wang et al. (2020), yang menemukan bahwa UAF membantu menjaga struktur serat otot dan mencegah kehilangan cairan saat thawing, khususnya pada udang. Efek ini penting karena kristal besar dapat merusak dinding sel, mengganggu tekstur, dan menyebabkan kehilangan nutrisi.

Pada penelitian oleh Tian et al. (2020) menggunakan lobak, bahan nabati dengan struktur jaringan rapat. Daya rendah (175 W) dan suhu -30°C , menghasilkan fase transisi es yang lebih cepat hingga 29%. Kombinasi ini menciptakan mikrostruktur pembekuan yang halus dan membantu mempertahankan tekstur dan kandungan air. Suhu rendah dalam UAF meningkatkan gradien termal yang mendukung pembentukan mikrokristal, sehingga sangat sesuai untuk bahan nabati dengan kadar air tinggi (Xie et al., 2021).

Namun, pada bahan sensitif seperti ikan karper, Menurut Ma et al. (2021) meskipun UAF dengan daya tinggi 350 W selama 6–10 menit pada suhu -20°C mempercepat pembekuan hingga 29,71%, intensitas ultrasound tinggi juga berisiko menimbulkan denaturasi protein. Jaringan hewani lunak cenderung rentan terhadap tekanan akustik tinggi, sehingga penyesuaian daya menjadi krusial untuk mencegah degradasi kualitas. (Zhou et al., 2020).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil review ini, dapat disimpulkan bahwa teknologi pembekuan dengan menggunakan ultrasound, khususnya *High-Intensity Ultrasound* (HIUS), memiliki potensi besar dalam meningkatkan kualitas makanan beku. Efektivitas teknologi ini sangat bergantung pada jenis bahan, intensitas daya, waktu paparan, dan suhu pembekuan. Penggunaan daya yang terlalu tinggi pada bahan sensitif sepe menyebabkan denaturasi protein, sehingga perlu dilakukan penyesuaian parameter yang tepat untuk tiap jenis pangan. Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal variasi bahan yang dikaji dan belum mencakup aspek ekonomi serta penerapan skala industri. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang lebih komprehensif untuk mengevaluasi keamanan, efisiensi energi, serta kelayakan komersial teknologi ini, sekaligus mengembangkan sistem pembekuan berbasis ultrasound yang terintegrasi dan adaptif terhadap berbagai karakteristik pangan.

DAFTAR REFERENSI

- Alizadeh, E., Chapleau, N., de Lamballerie, M., et al. (2007). Effect of different freezing processes on the microstructure of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(4): 493–499.
- Dolatowski, Z. J., Stadnik, J., & Stasiak, D. (2007). Applications of ultrasound in food technology. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 6(3), 88-99.
- Fu, X., Belwal, T., Cravotto, G., & Luo, Z. (2020). Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104726.
- Gallo, M., Ferrara, L., & Naviglio, D. (2018). Application of ultrasound in food science and technology: A perspective. *Foods*, 7(10), 164.9.
- Luo, W., Sun, D. W., Zhu, Z., & Wang, Q. J. (2018). Improving freeze tolerance of yeast and dough properties for enhancing frozen dough quality - A review of effective methods. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 72, pp. 25–33). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.017>
- Peña-Gonzalez, E., Alarcon-Rojo, A. D., Garcia-Galicia, I., Carrillo-Lopez, L., & Huerta-Jimenez, M. (2019). Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*, 53, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.045>
- Soltani Firouz, M., Sardari, H., Alikhani Chamgordani, P., & Behjati, M. (2022). Power ultrasound in the meat industry (freezing, cooking and fermentation): Mechanisms, advances and challenges. In *Ultrasonics Sonochemistry* (Vol. 86). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106027>
- Sukusno, P., H. Tambunan, A., Agus Setiawan, R. P., & Aris Purwanto, Y. (2018). The Effect of Receiver on the Performance of Freezer. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 6(3), 343–350. <https://doi.org/10.19028/jtep.06.3.343-350>
- Tao, Y., & Sun, D. W. (2015). Enhancement of food processes by ultrasound: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(4), 570-594.
- Xiong, G., Fu, X., Pan, D., Qi, J., Xu, X., & Jiang, X. (2020). Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104808>
- Xu, B. G., Zhang, M., Bhandari, B., Cheng, X. F., & Sun, J. (2015). Effect of ultrasound immersion freezing on the quality attributes and water distributions of wrapped red radish. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 1366-1376.
- Xu, B., Zhang, M., Bhandari, B., & Cheng, X. (2017). Influence of power ultrasound on ice nucleation of radish cylinders during ultrasound-assisted immersion freezing. *International Journal of Refrigeration*, 46, 1-8.

- Ying, Y., Xiang, Y., Liu, J., Chen, X., Hu, L., Li, Y., & Hu, Y. (2021). Optimization of ultrasonic-assisted freezing of *Penaeus chinensis* by response surface methodology. *Food Quality and Safety*, 5. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyaa034>
- Zhang, C., Sun, Q., Chen, Q., Kong, B., & Diao, X. (2020). Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of chicken breast. *International Journal of Refrigeration*, 117, 247-255.
- Zhu, Z., Zhang, P., & Sun, D. W. (2020). Effects of multi-frequency ultrasound on freezing rates and quality attributes of potatoes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104733>