

Modifikasi Protein dengan Bantuan Ultrasound: Efek pada Karakteristik Struktur, Kelarutan, Emulsifikasi dan Daya Busa

Ultrasound-Assisted Protein Modification: Effects on Structural Characteristics, Solubility, Emulsification, and Foaming

Iis Sa'diah^{1*}, Atia Fizriani¹

¹Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Garut, Indonesia

*Korespondensi penulis: iis.sadiyah@uniga.ac.id

ABSTRAK

Protein memiliki fungsi yang sangat dibutuhkan oleh tubuh. Namun untuk beberapa protein yang bersumber dari sereal terdapat prolamin yang dapat menimbulkan peptida anti-nutrisi yang dapat merugikan kesehatan. Modifikasi protein merupakan alternatif yang tepat untuk mengoptimalkan pemanfaatan protein. Modifikasi protein dengan bantuan gelombang ultrasonik memiliki keunggulan dalam meningkatkan kualitas fisikokimia protein karena efisiensinya tinggi, ramah lingkungan, lebih aman dan tidak beracun dibandingkan dengan modifikasi konvensional. Dalam ulasan ini akan dipaparkan mekanisme ultrasonik dalam modifikasi protein serta pengaruhnya pada sifat fungsional protein seperti emulsifikasi, kelarutan dan daya busa serta faktor yang mempengaruhinya. Aplikasi ultrasound sudah terbukti efektif dan efisien dalam modifikasi protein. Berdasarkan beberapa penelitian, penerapan ultrasound dalam modifikasi protein berpengaruh terhadap karakteristik struktur molekul protein, memperkecil ukuran partikel, meningkatkan kelarutan protein, meningkatkan pembentukan dan stabilitas emulsi serta meningkatkan stabilitas daya busa/foaming. Dalam ulasan ini, penulis juga memaparkan perspektif penelitian masa depan untuk perbaikan penelitian lebih lanjut.

Kata kunci: daya busa; emulsifikasi; kelarutan; modifikasi protein; ultrasound

ABSTRACT

Protein serves functions that are essential to the human body. However, certain proteins derived from cereals contain prolamins that can produce anti-nutritional peptides harmful to health. Protein modification is an appropriate alternative to optimize protein utilization. Ultrasound-assisted protein modification offers advantages in improving the physicochemical quality of protein because of its high efficiency, environmental friendliness, and greater safety compared to conventional modification methods. This review describes the mechanism of ultrasound in protein modification and its effect on functional properties such as emulsification, solubility, and foaming, along with the factors that influence them. The application of ultrasound has been shown to be effective and efficient in protein modification. Based on several studies, the application of ultrasound in protein modification affects the structural characteristics of protein molecules, reduces particle size, increases protein solubility, improves emulsion formation and stability, and enhances foam stability. In this review, the authors also present perspectives for future research to guide further study.

Keywords: emulsification; foaming; protein modification; solubility; ultrasound

PENDAHULUAN

Protein memiliki fungsi yang sangat dibutuhkan oleh tubuh dan tidak dapat digantikan oleh zat gizi lain. Kekurangan protein pada tubuh akan menyebabkan kelainan atau penyakit yang dinamakan kwashiorkor atau malnutrisi protein yang pada umumnya menyerang anak-anak di bawah umur lima tahun atau balita (Almatsier, 2001). Untuk mencegah malnutrisi protein dapat diatasi dengan peningkatan konsumsi protein.

Sumber protein yang berasal dari hewani seperti daging merupakan sumber protein yang baik karena memiliki daya cerna yang baik, komposisi asam amino yang unggul serta nilai biologisnya tinggi dalam memenuhi kebutuhan manusia (Henchion et al., 2017). Namun, sumber protein dari beberapa sereal seperti pada gandum, barley, dan gandum hitam mengandung prolamin yang dapat menimbulkan peptida anti-nutrisi yang dapat merugikan kesehatan (Henchion et al., 2017). Menurut Logie & Milanova (2008), beberapa studi meneliti hubungan antara konsumsi gluten/alergen serealia (terutama pada gandum) dengan gangguan kesehatan tertentu seperti penyakit jantung dan gangguan kadar gula darah, namun bukti mengenai kaitannya dengan gangguan perkembangan tertentu masih diperdebatkan dan memerlukan kajian lebih lanjut. Hal ini turut mendorong pengembangan produk pangan bebas gluten. Efektivitas protein dalam pangan perlu dikembangkan baik pada aspek gizi ataupun fungsionalnya. Saat ini, permintaan pasar terhadap produk yang mengandung protein semakin meningkat (Henchion et al., 2017). Para peneliti telah menemukan sumber protein alternatif dan memodifikasi protein sehingga diperoleh protein yang bernilai fungsional, bergizi, dipersonalisasi dan berkelanjutan (Jansens et al., 2019; Chen et al., 2018).

Saat ini, teknologi proses secara fisik dengan bantuan ultrasound telah banyak digunakan untuk memperbaiki kualitas fisikokimia protein karena efisiensinya tinggi, ramah lingkungan, lebih aman dan tidak beracun (Sadiyah et al., 2022; Sun et al., 2020; Yang et al., 2017). Efek mekanis, efek kavitasi dan termal yang ditimbulkan oleh ultrasound akan menghancurkan ikatan (ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik, dan ikatan ion) sehingga struktur molekul protein menjadi longgar dan meregang (Sun et al., 2020; F. Wang et al., 2020). Hal tersebut menyebabkan situs pembelahan enzimatis baru terbuka dan kemungkinan meningkatkan kontak antara enzim dan substrat sehingga mendorong enzimolisis dan meningkatkan pemanfaatan protein (Jiang et al., 2014; Yang et al., 2017). Menurut Huang et al. (2020) dan Téllez-Morales et al. (2020) faktor yang mempengaruhi efek ultrasonik dalam modifikasi protein diantaranya yaitu daya, frekuensi, waktu, suhu dan karakteristik bahan. Oleh karena itu, dalam makalah ini akan dipaparkan mekanisme ultrasonik dalam modifikasi protein serta pengaruhnya terhadap sifat fungsional protein seperti emulsifikasi, kelarutan dan daya busa.

METODE PENELITIAN

Kajian ini disusun dalam bentuk tinjauan pustaka (*literature review*) dengan menelusuri dan menganalisis artikel-artikel ilmiah primer yang relevan mengenai penerapan ultrasound dalam

modifikasi protein, bersumber dari basis data jurnal internasional bereputasi. Kata kunci penelusuran yang digunakan meliputi kombinasi istilah “ultrasound”, “protein modification”, “solubility”, “emulsification”, dan “foaming”. Artikel yang diulas difokuskan pada penelitian eksperimental mengenai pengaruh perlakuan ultrasound terhadap karakteristik struktur, ukuran partikel, kelarutan, sifat emulsifikasi, dan daya busa dari berbagai sumber protein pangan (di antaranya kedelai, whey, ovalbumin, daging, kacang tanah, walnut, dan gluten gandum), yang kemudian disintesis dan dibahas secara ilmiah untuk menjawab tujuan kajian.

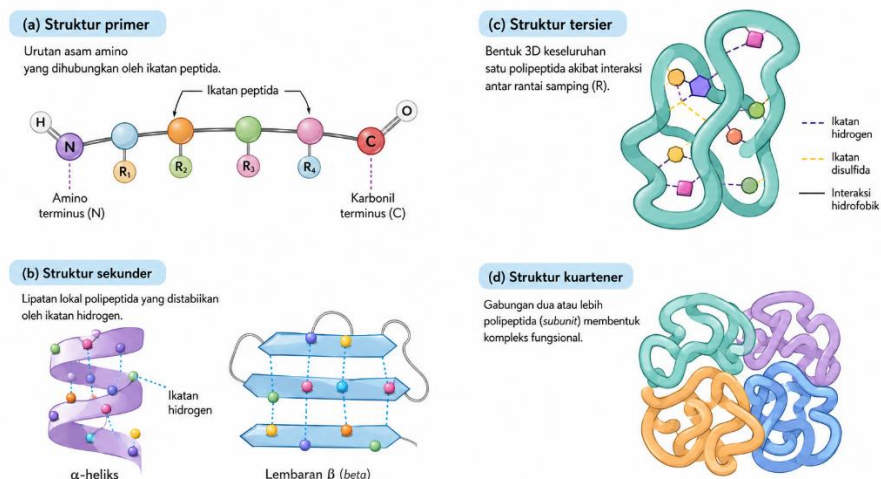
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Protein

Protein merupakan makromolekul yang berperan dalam banyak proses biologis. Penyusun protein merupakan asam amino yang dihubungkan oleh ikatan peptida membentuk rantai peptida dengan panjang dari dua asam amino (dipeptida), 4-10 peptida (oligopeptida), dan lebih dari 10 asam amino (polipeptida) (Gandy dkk, 2014). Asam amino memiliki perbedaan dalam jumlah dan distribusinya. Berdasarkan susunan atomnya, protein mengandung 50-55% atom karbon (C), 12-19% atom nitrogen (N), 20-23% atom oksigen (O), 6-7% atom hidrogen (H), dan 0,2-0,3% atom sulfur (S) (Estiasih, 2016).

a. Struktur Protein

Asam amino mengandung gugus amina primer dan asam karboksilat. Setiap asam amino memiliki gugus R yang berbeda dan dapat memberikan karakteristik polar (hidrofilik), non polar (hidrofobik), anionik dan kationik. Struktur protein dibedakan menjadi empat tingkatan yaitu primer, sekunder, tersier dan kuartener seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Protein: Primer, Sekunder, Tersier dan Kuartener.
Dibuat menggunakan ChatGPT (OpenAI, 2026).

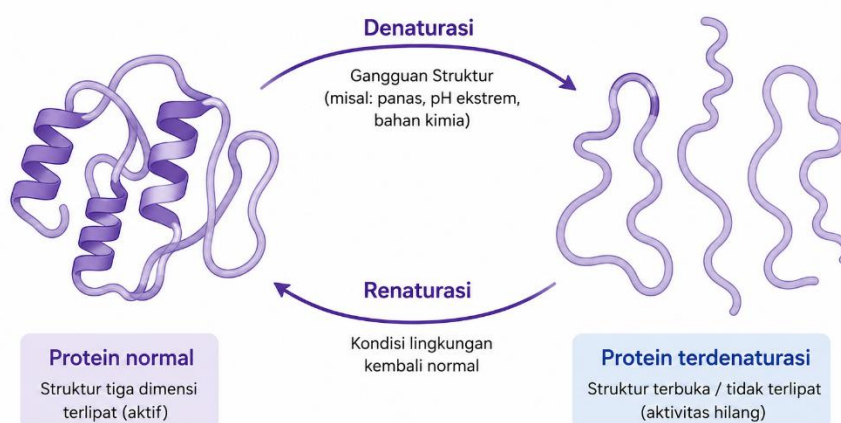
Struktur utama protein ditetapkan berdasarkan urutan karakteristik asam amino dari rantai polipeptida. Dalam satu molekul protein, asam amino dapat menimbulkan berbagai struktur sekunder lokal seperti alfa helix dan lembaran beta. Sementara beberapa molekul protein mengadopsi konfigurasi linier, dengan luasan yang bervariasi untuk membentuk struktur yang lebih bulat dan bentuk keseluruhan protein, yang distabilkan oleh berbagai interaksi termasuk ikatan hidrogen, disulfida dan interior jembatan yang disebut sebagai struktur tersier (Phillips, 2011). Asam amino hidrofobik cenderung berada di bagian dalam protein globular dengan dikelilingi asam amino hidrofilik. Protein globular biasanya larut dalam lingkungan berair (Phillips, 2011). Sementara struktur kuartener melibatkan asosiasi dua atau lebih rantai polipeptida yang membentuk multisubunit atau protein oligomerik (Muchtadi, 2010).

b. Sumber Protein

Sumber protein dapat diperoleh dari bahan nabati (sereal dan kacang-kacangan) maupun hewani (susu, daging, ikan dan kerang) (FAO, 2010). Sumber protein yang paling banyak dikaji dalam penelitian modifikasi berbantuan ultrasound di antaranya kedelai, whey, ovalbumin, daging (ayam dan babi), kacang tanah, walnut, gluten gandum, dan protein ampas beras, yang efek perlakuan ultrasoundnya terhadap sifat fungsional masing-masing diuraikan pada bagian selanjutnya.

c. Denaturasi Protein

Denaturasi protein adalah fenomena transformasi struktur protein yang berlipat menjadi terbuka dan mempengaruhi sifat protein (Estiasih, 2016). Denaturasi protein akan mengubah struktur sekunder, tersier dan kuartener dari protein.



Gambar 2. Denaturasi dan Renaturasi Protein
Diadaptasi dari Phillips (2011) dengan bantuan ChatGPT (OpenAI, 2026).

Ikatan hidrogen dan ikatan hidrofobik dipecah selama denaturasi sehingga menimbulkan kerusakan pada molekulnya. Denaturasi menyebabkan kelarutan protein menjadi berkurang dan hilangnya aktivitas biologis (Phillips, 2011). Denaturasi dapat disebabkan oleh faktor fisik (panas, tekanan, pengadukan) atau kimiawi (pH, pelarut organik, senyawa organik, garam) (Kusnandar, 2020).

Saat larutan protein dipanaskan di atas suhu kritis akan terjadi destabilisasi interaksi nonkovalen di dalam protein (denaturasi), namun akan mengalami stabilisasi kembali ketika suhu rendah (renaturasi) (Kusnandar, 2010). Pemberian tekanan yang cukup tinggi (1-12 kbar) pada suhu 25°C dapat menyebabkan denaturasi karena protein bersifat fleksibel dan dapat dikompresi. Akibatnya volume protein menjadi menurun karena hilangnya rongga dalam struktur protein dan hidrasi protein. Denaturasi akibat pengadukan dengan kecepatan tinggi dapat menyebabkan kavitas sehingga protein mudah terdenaturasi sebagai akibat dari inkorporasi udara dan adsorpsi molekul protein ke dalam antarmuka udara-cairan (Kusnandar, 2010).

Pada pH ekstrem, struktur protein akan membengkak dan terbuka terutama pada pH alkali dimana terjadi ionisasi gugus karboksil, fenolik, dan sulfihidril di bagian dalam protein. Rantai samping residu asam amino nonpolar akan lebih larut dalam pelarut organik, hal tersebut menyebabkan interaksi hidrofobik menjadi melemah. Garam juga dapat menurunkan hidrasi dan ketidakstabilan struktur protein karena berikatan kuat dengan protein (Phillips, 2010).

d. Modifikasi Protein

Modifikasi protein biasanya dilakukan secara fisik, kimia atau biokimia. Modifikasi protein akan memberikan perbaikan sifat fungsional, namun modifikasi berlebihan akan menyebabkan penurunan fungsi protein itu sendiri sehingga metode yang tepat dalam modifikasi harus dipertimbangkan.

Fisik. Protein nabati sangat rentan terhadap suhu tinggi sehingga mudah mengalami denaturasi dan agregasi protein. Selama penghilangan lemak, suhu tinggi harus dihindari karena menyebabkan penurunan ekstraksi protein (Mosenthin et al., 2016). Namun untuk sampel protein yang diisolasi dapat diberikan perlakuan termal dalam memperbaiki sifat fungsionalnya. Barbin et al. (2011) menyebutkan perlakuan termal memberikan efek positif dalam hal kapasitas stabilitas emulsi dan pengikatan air, namun menurunkan kapasitas emulsi dan kelarutan protein. Barbin et al. (2011) juga menyebutkan bahwa kelarutan protein akan berkurang ketika homogenisasi tekanan tinggi (18 MPa), namun akan meningkatkan kemampuan emulsi dan stabilitas konsentrat protein. Hal ini didukung oleh penelitian He et al. (2014) bahwa pemberian tekanan 200-600 MPa memberikan perbaikan pada sifat gelasi, stabilitas termal dan hidrofobisitas permukaan.

Kimia/Biokimia. Modifikasi secara kimia/biokimia dapat dilakukan dengan metode asilasi, glikasi/fosforilasi, cross-linking dan hidrolisis. Asilasi umumnya dilakukan dengan memanfaatkan klorida atau anhidrida responsif karena mudah bereaksi dengan gugus sulfihidril, gugus amino atau gugus hidroksil yang merupakan gugus nukleofilik dalam protein (Malabat et al., 2001). Fosforilasi isolat dengan pH >7 memberikan perbaikan pada sifat busa dan kelarutan protein (Krause, 2002). Berdasarkan Z. Wang et al. (2018) peningkatan tingkat fosforilasi menyebabkan

protein terungkap dan menghasilkan agregasi, ikatan silang dan peningkatan hidrofobisitas. Metode cross-linking protein dengan transglutaminase yang dilakukan oleh Arntfield (2008) memberikan perbaikan pada kekerasan dan kekenyalan gel. Hidrolisis protein dapat dilakukan secara kimiawi atau enzimatis. Menurut Chabanon et al. (2007) dan Vioque et al. (1999) hidrolisis menyebabkan kelarutan protein dalam air meningkat yang disebabkan oleh pembentukan asam amino bebas dan ikatan peptida.

2. Ultrasound

Ultrasonografi merupakan gelombang suara yang memiliki frekuensi melebihi ambang batas pendengaran manusia yaitu dari 20 kHz hingga beberapa GHz. Umumnya, spektrum ultrasound berkisar pada frekuensi antara 20 kHz dan 1 GHz. Sumber suara yang dihasilkan berasal dari benda yang bergetar yang menyebabkan media disekitarnya ikut bergetar dan kemudian gelombang ultrasonik mentransfer energi ke partikel tetangga lainnya (Escalapez et al., 2011).

Gelombang ultrasonik dibedakan menjadi dua aplikasi utama yaitu perawatan non destruktif dan destruktif. Dalam bentuk non destruktif, pengujian dilakukan untuk mengetahui perubahan senyawa fisikokimia atau sifat akustik material yang berhubungan dengan fenomena bahan seperti patah atau kerusakan material dan menghasilkan gelombang ultrasonik yang dapat terdeteksi oleh perangkat pemancar ultrasound dan detektor terutama pada bahan piezoelektrik (Carillo et al., 2017).

Ultrasonografi diklasifikasikan menjadi ultrasonografi intensitas tinggi ($>1 \text{ W cm}^{-2}$, 20-100 kHz) dan ultrasonografi intensitas rendah ($0-1 \text{ W cm}^{-2}$, $>100 \text{ kHz}$) (Nowacka & Wedzik, 2016). Frekuensi tinggi dan daya yang rendah pada ultrasonografi menghasilkan sensitivitas yang baik dan tidak mempengaruhi sifat fisik dan kimiawi material, tetapi menimbulkan getaran pada molekul material. Sedangkan pada frekuensi rendah dan daya yang tinggi menimbulkan perubahan kimiawi, mekanis dan fisik pada material. Hal tersebut dipengaruhi oleh efek kavitasi (Mohammadi et al., 2014).

Salah satu fenomena kunci yang mendasari efek ultrasound terhadap protein adalah kavitasi, yaitu proses nukleasi, pertumbuhan, dan keruntuhan gelembung mikro dalam larutan akibat perambatan gelombang ultrasonik yang kuat (Ohl & Wolfrum, 2003; Leong et al., 2011). Keruntuhan gelembung mikro tersebut menghasilkan turbulensi lokal, gaya geser, gelombang kejut, serta pelepasan energi panas dalam skala mikro (tekanan hingga ratusan bar dan suhu hingga ribuan Kelvin), yang secara mekanis mampu memutus ikatan nonkovalen (ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik dan ikatan ion) dalam struktur protein (Leong et al., 2011; Yasui, 2010). Efek kavitasi inilah yang menjadi dasar mekanisme ultrasound dalam memodifikasi struktur dan sifat fungsional protein, sebagaimana diuraikan lebih lanjut pada bagian berikut.

3. Mekanisme Ultrasound dalam Modifikasi Protein

Penerapan ultrasound pada modifikasi protein bergantung pada intensitas, kekuatan ion, suhu, waktu serta karakteristik sumber protein (Higuera-Barraza et al., 2016). Efek kavitasi, efek

mekanis dan termal yang ditimbulkan oleh ultrasound akan menghancurkan ikatan hidrogen, interaksi hidrofobik, dan ikatan ion sehingga struktur molekul protein menjadi longgar dan meregang (Sun et al., 2020; Z. Wang et al., 2018). Hal tersebut menyebabkan situs pembelahan enzimatis baru dan kemungkinan meningkatkan kontak antara enzim dan substrat untuk meningkatkan pemanfaatan protein dan mendorong enzimolisis (F. Wang et al., 2020; Yang et al., 2017).

Studi yang dilakukan oleh Sun et al. (2020) dan F. Wang et al. (2020) menyebutkan bahwa getaran mekanis akan mengganggu ikatan molekul antar protein, menghancurkan dinding sel, menyebabkan perpindahan massa dan peningkatan kelarutan protein. Penerapan sonikasi menyebabkan sedikit perubahan pada struktur sekunder protein seperti peningkatan random coil, β -spin, dan β -laminar serta penurunan α -helix (Zhu et al., 2018). Penerapan ultrasonik intensitas tinggi (HIUS) yang dilakukan oleh Xiong et al. (2016) pada bahan ovalbumin menyebabkan perubahan struktur tersier dan pembukaan parsial karena kandungan sulfhidril dalam permukaan ovalbumin menjadi meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa fenomena kavitasasi seperti aksi jet mikro, turbulensi, gelombang kejut dan gaya geser dari penerapan HIUS dapat memutus ikatan disulfida (Hu et al., 2013; Jin et al., 2015). Penerapan ultrasound pada frekuensi 20 kHz hampir tidak berdampak pada perubahan struktur sekunder dan struktur tersier pada bahan glisinin kedelai (Zhou et al., 2016). Sonikasi yang ditingkatkan pada produk susu yang dilakukan oleh Shanmugam et al. (2012), menyebabkan gangguan parsial pada beberapa protein whey namun tidak berdampak pada perubahan struktur kasein misel. Selain itu, pada produk susu penerapan sonikasi tidak berdampak pada penurunan kandungan protein atau laktosa susu (Cameron et al., 2010). Penelitian Chandrapala et al. (2011) menyebutkan bahwa sonikasi pada larutan konsentrat protein whey berdampak pada sedikit perubahan struktur sekunder dan hidrofobisitas protein tetapi tidak mengubah gugus tiol. Chandrapala et al. (2011) juga menyebutkan saat larutan konsentrat protein whey disonikasi selama 5 menit terjadi penurunan denaturasi, namun saat sonikasi ditingkatkan akan meningkatkan denaturasi sebagai akibat dari agregasi protein. Li et al. (2020) menyelidiki ultrasound dengan bantuan perlakuan perubahan pH dapat menurunkan ukuran partikel dan potensi zeta, terutama di bawah pH basa.

Menurut Téllez-Morales et al. (2020) faktor-faktor yang mempengaruhi efek ultrasound dalam modifikasi pangan yaitu daya/kekuatan, frekuensi, waktu dan suhu ultrasound.

4. Pengaruh Penerapan Ultrasound pada Sifat Fungsional Protein

Penerapan ultrasound dalam meningkatkan sifat fungsional protein telah banyak dilakukan pada bidang ilmu dan teknologi pangan. Sifat fungsional protein diantaranya sebagai agen pembentuk gel, daya busa (foaming), stabilisator, atau pengemulsi dalam makanan (Resendiz-Vazquez et al., 2017). Dalam makalah ini akan diuraikan efek ultrasound dan faktor yang berpengaruh pada sifat kelarutan, ukuran partikel, karakteristik struktur setelah modifikasi, emulsifikasi dan kemampuan daya busa/*foaming*.

a. Kelarutan (Solubility)

Kelarutan merupakan salah satu dari sifat fungsional protein yang berperan dalam sifat emulsifikasi, gelasi dan sifat reologi (Hu et al., 2013).

Tabel 1. Kelarutan Beberapa Sumber Protein

Sumber Protein	Metode	Hasil	Referensi
Isolat protein kedelai	Ultrasound dengan berbagai larutan ionik (1-butyl-2,3-dimetil imidazolium klorida, 1-etil-3-metil imidazolium klorida, dan 1-butyl-3-metil imidazolium klorida)	Kelarutan meningkat ketika diproses dengan kombinasi ultrasound dan 1 mg/mL 1-butyl-2,3-dimetil imidazolium klorida dibandingkan dengan ultrasound tunggal atau larutan ionik tunggal.	Huang et al. (2020)
Protein walnut	Ultrasound (20 kHz, 15 menit, 600 W)	Penerapan ultrasound meningkatkan kelarutan isolat protein walnut dibandingkan kontrol.	Zhu et al. (2018)
Protein whey	High intensity ultrasound (HIUS)	Kelarutan protein whey meningkat pada USG berenergi tinggi (20–40 kHz) pada intensitas rendah selama 15–30 menit.	Jambrak et al. (2008)
Protein whey, protein telur, protein kedelai terisolasi	HIUS (20 kHz, 20 menit, amplitudo 20%, 0,71 W)	Ultrasonografi dapat meningkatkan kelarutan protein telur dan protein kedelai terisolasi, tetapi tidak meningkatkan kelarutan protein whey.	Arzeni et al. (2012)
Daging ayam	Pulsed ultrasound (240 W, variasi waktu 0, 3, 6, 9, 12, 15 menit)	Peningkatan waktu ultrasound (0–9 menit) menyebabkan kelarutan meningkat, namun kelarutan menurun pada rentang 9–15 menit.	J. yu Wang et al. (2017)
Kedelai (glisinin)	High-intensity ultrasound (20 kHz, 80 W/cm ² , 0–40 menit) dengan tiga kekuatan ionik (0,06; 0,2; 0,6) pH 7	HIU selama 5 menit dapat meningkatkan kelarutan glisinin; efek dominan terjadi pada 5 menit pertama (I = 0,6).	Zhou et al. (2016)

Perlakuan sonikasi menyebabkan kelarutan protein menjadi meningkat (Li et al., 2020) hal ini berkaitan dengan tingginya nilai hidrofobisitas, penurunan ukuran partikel dan interaksi antarmolekul (Hu et al., 2013). Ultrasound menyebabkan rusaknya ikatan disulfida sehingga

menyebabkan ukuran partikel menjadi kecil. Berdasarkan J. yu Wang et al. (2017) dan Tang et al. (2009) tingginya kelarutan protein disebabkan oleh terganggunya interaksi hidrofobik, pembentukan agregat protein dan peningkatan waktu ultrasound. Faktor lain yang berpengaruh terhadap kelarutan yaitu tekanan lokal dan suhu sonikasi. Peningkatan suhu menyebabkan peningkatan interaksi antara protein dengan air sebagai akibat dari kerusakan kecil pada agregat protein (Arzeni et al., 2012). Jambrak et al. (2008) juga menyatakan interaksi antara protein dan air dapat disebabkan oleh konduktivitas listrik yang meningkat selama sonikasi. Sedangkan pemberian intensitas tinggi akan menghambat kapasitas kelarutan (Arzeni et al., 2012). Selain itu, perlakuan kombinasi antara ultrasound dengan larutan ionik memberikan efisiensi kelarutan lebih besar sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh Huang et al. (2020).

b. Ukuran Partikel

Ukuran partikel merupakan faktor utama yang dapat mempengaruhi fungsi sifat protein dan perubahan konformasi protein (Hu et al., 2015). Beberapa penelitian pada ukuran partikel protein modifikasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran Partikel Berbagai Sumber Protein

Sumber Protein	Metode	Hasil	Referensi
Isolat protein arachin dan conarachin kacang tanah	Ultrasound (20 kHz, daya maksimum 950 W) dibandingkan alkali/pengendapan asam	Ukuran partikel arachin dan conarachin dengan ultrasound lebih rendah (87,89 dan 95,87 nm) dibandingkan metode alkali (97,72 dan 96,89 nm).	Sun et al. (2020)
Isolat protein kedelai	Ultrasound dengan berbagai larutan ionik	Ukuran partikel dengan kombinasi ultrasound dan 1 mg/mL 1-butyl-2,3-dimethyl imidazolium klorida lebih kecil dibandingkan ultrasound tunggal atau larutan ionik tunggal.	Huang et al. (2020)
Isolat protein ampas beras	Alkali dan kombinasi alkali-ultrasound	Terjadi penurunan ukuran partikel pada kombinasi alkali dan ultrasound (219,6 nm) dibandingkan perlakuan alkali tunggal (330,8 nm).	Zhang et al. (2020)
Kedelai (glisinin)	High-intensity ultrasound (80 W/cm ² , 20 kHz, 0–40 menit) dengan tiga kekuatan ionik	Ukuran partikel glisinin menurun pada ketiga kekuatan ionik setelah HIU, dan semakin rendah seiring peningkatan kekuatan ionik.	Zhou et al. (2016)

Pengurangan ukuran partikel dikaitkan dengan kekuatan kavitasi (Jambrak et al., 2008). Perilaku kavitasi gelembung dipengaruhi oleh suhu dimana suhu ultrasound yang lebih tinggi akan

mengarah ke ukuran partikel yang lebih besar karena berkurangnya intensitas kavitasi yang diakibatkan tekanan uap tinggi di dalam gelembung kavitasi (Pankaj & Ashokkumar, 2011). Peningkatan kepadatan energi ultrasound lebih lanjut juga menyebabkan peningkatan yang signifikan dalam ukuran partikel. Agregasinya mungkin disebabkan oleh turbulensi dan tegangan geser pada kepadatan energi yang lebih tinggi, atau pembentukan beberapa jenis ikatan kovalen lainnya (Hu et al., 2013). Kombinasi penggunaan ultrasound dengan jenis pelarut berpengaruh besar terhadap ukuran partikel. Hal ini menunjukkan bahwa larutan ionik menginduksi transformasi dari agregat tak larut menjadi agregat terlarut. Agregat terlarut ini dikumpulkan kembali dengan perlakuan awal ultrasonik dalam larutan ionik (Huang et al., 2020). Perubahan ukuran partikel protein yang diinduksi oleh ultrasound intensitas tinggi bergantung pada agregasi, derajat denaturasi dan sifat protein (Ozuna et al., 2015). Selama proses ultrasonikasi dapat menghancurkan interaksi antarmolekul (seperti ikatan hidrogen, interaksi elektrostatik dan hidrofobisitas) antara molekul protein, sehingga terjadi penurunan ukuran partikel. Penurunan ukuran partikel ini dapat mencegah pembentukan asam amino ikatan silang (Z. Zhang et al., 2020).

c. Karakteristik Struktur

Penerapan ultrasound pada beberapa penelitian berpengaruh terhadap karakteristik struktur protein (Tabel 3).

Tabel 3. Karakteristik Berbagai Sumber Protein

Sumber Protein	Metode	Hasil	Referensi
Isolat protein arachin dan conarachin kacang tanah	Ultrasound dan pelarut alkali/pengendapan asam	Kandungan α -helix, β -sheet, dan β -turn pada ultrasound lebih tinggi dibandingkan metode alkali; namun tidak stabil pada 0–30 menit, dan kembali meningkat pada 50 menit.	Sun et al. (2020)
Isolat protein kedelai	Ultrasound dengan berbagai larutan ionik	Ultrasound dibantu larutan ionik mengubah struktur sekunder isolat protein kedelai secara signifikan.	Huang et al. (2020)
Ovalbumin	HIUS (20 kHz, 20 dan 40 menit)	Tidak berpengaruh signifikan pada struktur sekunder.	Xiong et al. (2016)
Daging ayam	Pulsed ultrasound (240 W, variasi waktu)	Penurunan signifikan pada α -helix dan β -sheet (0–15 menit), peningkatan β -turn pada 6 menit.	J. yu Wang et al. (2017)

Sumber Protein	Metode	Hasil	Referensi
Isolat protein ampas beras	Frekuensi ganda sekuensial 20/40 kHz	Mengurangi koil acak dan kandungan β -sheet, sementara α -helix dan β -turn meningkat.	Zhang et al. (2020)
Protein beras	Pretreatment ultrasound 20/35 kHz	Mengurangi β -sheet, α -helix, dan β -turn.	Yang et al. (2017)

Struktur sekunder protein bergantung pada sekuens lokal asam amino dan interaksi antara berbagai bagian molekul (Zhou & Yang, 2020), dan ultrasonografi mengarah pada perubahan struktur sekunder dengan mengganggu interaksi tersebut. Hu et al. (2013) menyatakan waktu USG tidak berpengaruh pada struktur sekundernya melainkan pada struktur tersiernya. Namun J. Yu Wang et al. (2017) menyatakan bahwa suhu berpengaruh terhadap perubahan struktur protein. Peningkatan dan penurunan perubahan struktur berkaitan dengan ikatan intra hidrogen rantai peptida (α -helix) dan ikatan antar hidrogen antara rantai peptida (β -sheet) (Zhang et al., 2020).

d. Sifat Emulsifikasi

Pemanfaatan protein dalam membentuk dan menstabilkan emulsi sangat dibutuhkan dalam produk makanan, minuman, desserts, saus dan batters (Kinsella, 1979).

Tabel 4. Sifat Emulsifikasi Berbagai Sumber Protein

Sumber Protein	Metode	Hasil	Referensi
Isolat protein arachin dan conarachin kacang tanah	Ultrasound (6,33 W/cm ³ arachin; 3,17 W/cm ³ conarachin, 20 kHz, 30 menit)	Indeks aktivitas dan stabilitas emulsi lebih tinggi dibandingkan pelarut alkali/pengendapan asam.	Sun et al. (2020)
Isolat protein kedelai	Ultrasound dan asam (200 W, 20 kHz)	Perlakuan 10 menit menunjukkan kapasitas emulsi lebih baik; perlakuan 30 menit justru menyebabkan ketidakstabilan emulsi.	Huang et al. (2019)
Ovalbumin	HIUS	Aktivitas pengemulsi meningkat dibandingkan ovalbumin tanpa perlakuan.	Xiong et al. (2016)
Protein walnut	Ultrasound (20 kHz, 15 menit, 600 W)	Pembentukan dan stabilitas emulsi meningkat seiring peningkatan kekuatan dan waktu sonikasi.	Zhu et al. (2018)

Sumber Protein	Metode	Hasil	Referensi
Protein susu	Ultrasound (20 kHz, 95% amplitudo, 2 menit) vs kontrol	Stabilitas dan pembentukan emulsi bertahan 27 hari, dibandingkan 7 hari pada kontrol.	O'Sullivan et al. (2016)
Protein whey	Ultrasound berenergi tinggi (20 kHz, amplitudo 20–40%, suhu 30–50°C)	Hasil terbaik pada fasa minyak 5% dan WPI 20% pada suhu 40–45°C; ketidakstabilan pada 50°C.	Chalothorn & Warisnoicharoen (2012)
Kedelai (glisinin)	HIUS (20 kHz, 80 W/cm ² , 0–40 menit)	Indeks aktivitas pengemulsi meningkat seiring peningkatan waktu HIU menjadi 40 menit.	Zhou et al. (2016)

Kelarutan, hidrofobisitas dan stabilitas struktur protein berpengaruh terhadap sifat pengemulsi (Q. T. Zhang et al., 2014). Menurut Chalothorn dan Warisnoicharoen (2012) peningkatan suhu dapat meningkatkan kelarutan karena pada suhu yang tinggi mengakibatkan ukuran gelembung dalam kavitas berkurang. Namun penelitian tersebut juga menyebutkan bahwa peningkatan suhu 50°C menyebabkan kelarutan menjadi rendah, hal tersebut dikaitkan dengan kemungkinan denaturasi protein yang berpengaruh terhadap stabilitas dan peningkatan ukuran sistem. Menurut Yanzun et al. (2014) efek turbulen (kavitas) selama aplikasi ultrasound menyebabkan besarnya integrasi gelembung dalam fase oli emulsi sehingga terjadi peningkatan indeks stabilitas pengemulsi (EEI). Kemampuan sifat pengemulsi setelah penerapan ultrasound digambarkan pada salah satu penelitian yang dilakukan oleh Sun et al. (2020).

Sifat pengemulsi dapat dikaitkan dengan intensitas fluoresensi yang lebih tinggi, sementara tingkat agregasi protein yang tinggi berpengaruh terhadap indeks aktivitas emulsi dan indeks stabilitas emulsi (Tang et al., 2009). Tingginya sifat pengemulsi berkaitan dengan tingginya kandungan struktur α -heliks sedangkan penurunan sifat pengemulsi berkaitan dengan peningkatan putaran β dan penurunan struktur acak (B. Wang et al., 2020; Huang et al., 2019; Jin et al., 2015).

Suhu berpengaruh terhadap sifat pengemulsi. Menurut Q. T. Zhang et al. (2014) suhu tinggi berpengaruh terhadap hidrofobisitas permukaan, memperkecil ukuran partikel dan mengubah struktur sekunder protein. Q. T. Zhang et al. (2014) juga menyebutkan bahwa interaksi hidrofobik dan pembentukan ikatan disulfida berpengaruh pada sifat emulsi protein. Menurut O'Sullivan et al. (2016) ultrasound dapat meningkatkan eksposur kromofor ke pelarut dan menyebabkan penurunan tegangan antarmuka, peningkatan adsorpsi protein pada antarmuka minyak-air, dan peningkatan sifat pengemulsi protein. Waktu perawatan ultrasonik berpengaruh pada kecepatan adsorpsi protein pada antarmuka protein dalam minyak (Huang et al., 2019). Sonikasi menyebabkan beberapa gugus non-polar terpapar ke fase air di sekitarnya dan mendorong sebagian globular protein sehingga meningkatkan aktivitas permukaannya (Hu et al., 2015).

e. Sifat Foaming/Daya Busa

Penerapan ultrasonik dalam peningkatan stabilitas pembusaan telah banyak dilaporkan, sebagaimana dalam Tabel 5.

Tabel 5. Sifat Daya Busa Berbagai Sumber Protein

Sumber Protein	Metode	Hasil	Referensi
Ovalbumin	HIUS (20 kHz, 20 dan 40 menit)	Kemampuan busa meningkat signifikan dibandingkan ovalbumin tanpa perlakuan.	Xiong et al. (2016)
Protein walnut	Ultrasound (20 kHz, 15 menit, 600 W)	Kemampuan dan stabilitas busa meningkat.	Zhu et al. (2018)
Protein whey, protein terisolasi dan hidrolisat (10% w/w)	HIUS (20 kHz, 15–30 menit)	Kemampuan berbusa dan stabilitas lebih tinggi pada ketiga sumber protein.	Jambrak et al. (2008)
Protein kedelai	Ultrasound (20 kHz, amplitudo 20%) dan suhu terkontrol (75–85°C)	Terjadi peningkatan daya busa setelah sonikasi.	Morales et al. (2015)
Protein gluten gandum	Ultrasound berenergi tinggi (10 menit, 20 kHz, amplitudo 60–100%)	Amplitudo 100% dan 60% memberi stabilitas busa 83% dan 55%, dibandingkan 38% tanpa USG.	H. Zhang et al. (2011)

Protein merupakan bahan pembusa yang baik karena dapat berdifusi ke permukaan udara-air dan membentuk lapisan kohesif dan elastisitas yang kuat. Perlakuan ultrasonik probe pada 20 kHz selama 20 menit dan 40 menit dapat meningkatkan kapasitas berbusa, dan menurunkan tegangan antarmuka (udara-air dan minyak-air), yang disebabkan oleh penurunan muatan bersih permukaan dan peningkatan hidrofobisitas permukaan dalam ovalbumin (Xiong et al., 2016). Kapasitas dan stabilitas busa juga meningkat secara bertahap seiring dengan peningkatan daya (H. Zhang et al., 2011).

Kemampuan pembusaan dikaitkan dengan denaturasi parsial selama aplikasi ultrasound, karena peningkatan suhu mengekspos daerah hidrofobik dan memungkinkan interaksi yang lebih baik dengan antarmuka, yang mengarah pada stabilitas yang lebih besar (H. Zhang et al., 2011). Sifat pembusaan protein berkaitan dengan muatan permukaan, hidrofobisitas permukaan, fleksibilitas molekul dan ukuran partikel (Q. T. Zhang et al., 2014). Peningkatan ukuran partikel protein menurunkan tingkat adsorpsi protein air dalam minyak atau minyak dalam air (Damodaran, 2005).

5. Aplikasi Sifat Fungsional Protein dalam Pangan

Penerapan ultrasound dalam modifikasi protein berperan besar dalam menghasilkan sifat fungsional protein seperti efisiensi energi dan waktu pemrosesan yang lebih cepat sehingga penerapan sifat protein tersebut akan lebih optimal diaplikasikan dalam produk pangan. Berikut disajikan beberapa produk pangan dari sifat fungsional protein.

Tabel 6. Sifat Fungsional Protein dalam Produk Pangan (Kinsella, 1979)

Sifat Fungsional	Jenis Reaksi	Aplikasi dalam Pangan
Kelarutan	Kelarutan protein tergantung pada pH	Minuman
Penyerapan dan pengikatan air	Ikatan hidrogen, penjeratan air	Sosis, roti, cake
Emulsifikasi	Pembentukan dan stabilitas emulsi	Kue, makanan penutup beku, mayones, saus salad, susu, adonan, dan penghias kopi
Pembentukan busa	Pembentukan film stabil untuk menjerat gas	Cake, whipped topping

Berdasarkan Kusnandar (2020) sifat fungsional protein dalam pangan dibedakan menjadi 3 faktor, yaitu faktor internal protein (komposisi protein, homogenitas protein dan konformasi protein), faktor eksternal/lingkungan (air, pH, ion, suhu, lemak oksidator/reduktor, gula) dan proses pengolahan (pembekuan, pendinginan, pemanasan, pemekatan, penambahan garam, pengeringan, pengadukan dan modifikasi kimia/enzimatis).

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian dari beberapa literatur, modifikasi protein dengan bantuan ultrasonik menghasilkan efek kavitasi, efek mekanis dan efek termal yang akan menghancurkan interaksi hidrofobik, ikatan ion dan ikatan hidrogen sehingga struktur molekul protein menjadi longgar dan meningkatkan pemanfaatan protein. Faktor yang berpengaruh dalam modifikasi protein menggunakan bantuan ultrasound diantaranya daya/kekuatan, frekuensi, pelarut, waktu dan suhu ultrasound. Optimalisasi ultrasound dalam modifikasi protein dapat berpengaruh terhadap karakteristik struktur molekul protein, memperkecil ukuran partikel, meningkatkan kelarutan protein, meningkatkan pembentukan dan stabilitas emulsi serta meningkatkan stabilitas daya busa/*foaming*.

Berdasarkan kajian dari beberapa literatur, ultrasound memiliki potensi aplikasi yang besar dalam modifikasi protein karena kemampuannya dalam memperbaiki sifat fungsional berbagai protein dalam waktu yang lebih singkat dan ramah lingkungan seperti meningkatkan kelarutan, emulsifikasi dan daya busa. Dalam beberapa literatur, penulis menemukan hasil yang bertentangan pada lama waktu proses modifikasi menggunakan ultrasound; pada sebagian penelitian disebutkan bahwa peningkatan waktu ultrasound dapat menurunkan kelarutan, sedangkan pada penelitian lain disebutkan bahwa peningkatan waktu ultrasound secara signifikan dapat meningkatkan kelarutan, sehingga diperlukan studi lebih lanjut mengenai pemberian waktu yang optimal dalam modifikasi protein. Selain itu, penulis menemukan bahwa penggunaan kombinasi ultrasound dengan larutan ionik berpengaruh positif pada ukuran partikel dan kelarutan, namun juga berpengaruh pada penurunan α -heliks dan peningkatan lembaran β dalam struktur sekunder, sehingga perlu adanya studi lanjut untuk perbaikan dan pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Arzeni, C., Martínez, K., Zema, P., Arias, A., Pérez, O. E., & Pilosof, A. M. R. (2012). Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 463--472. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.018>
- Almatsier, S. 2001. *Prinsip Dasar Ilmu Gizi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama
- Barbin, D. F., Natsch, A., & Müller, K. (2011). Improvement of functional properties of rapeseed protein concentrates produced via alcoholic processes by thermal and mechanical treatments. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(3), 369--375. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00476.x>
- Cameron, M., McMaster, L. D., & Britz, T. J. (2010). Erratum: Impact of ultrasound on dairy spoilage microbes and milk components (*Dairy Science and Technology* (2009) 89 (83-98)). *Dairy Science and Technology*, 90(1), 119. <https://doi.org/10.1051/dst/2010003>
- Chabanon, G., Chevalot, I., Framboisier, X., Chenu, S., & Marc, I. (2007). Hydrolysis of rapeseed protein isolates: Kinetics, characterization and functional properties of hydrolysates. *Process Biochemistry*, 42(10), 1419--1428. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.07.009>
- Chandrapala, J., Zisu, B., Palmer, M., Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2011). Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(5), 951--957. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.12.016>
- Chen, X., Tume, R. K., Xiong, Y., Xu, X., Zhou, G., Chen, C., & Nishiumi, T. (2018). Structural modification of myofibrillar proteins by high-pressure processing for functionally improved, value-added, and healthy muscle gelled foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(17), 2981--3003. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1347557>
- Damodaran, S. (2005). Protein stabilization of emulsions and foams. *Journal of Food Science*, 70(3). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07150.x>

- Esclapez, M. D., García-Pérez, J. V., Mulet, A., & Cárcel, J. A. (2011). Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Products. *Food Engineering Reviews*, 3(2), 108--120. <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9036-6>
- Estiasih, T., dkk. 2016. *Kimia dan Fisik Pangan*. Bumi Aksara.
- FAO. 2010. *The State of Food Insecurity in the World, Addressing Food Insecurity in Protracted Crises*; FAO: Rome, Italy, 2010.
- Gandy, J.W., dkk. 2014. *Gizi dan Dietetika Edisi 2*. EGC. Jakarta.
- He, R., He, H. Y., Chao, D., Ju, X., & Aluko, R. (2014). Effects of High Pressure and Heat Treatments on Physicochemical and Gelation Properties of Rapeseed Protein Isolate. *Food and Bioprocess Technology*, 7(5), 1344--1353. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1139-z>
- Henchion, M., Hayes, M., Mullen, A., Fenelon, M., & Tiwari, B. (2017). Future Protein Supply and Demand: Strategies and Factors Influencing a Sustainable Equilibrium. *Foods*, 6(7), 53. <https://doi.org/10.3390/foods6070053>
- Higuera-Barraza, O. A., Del Toro-Sanchez, C. L., Ruiz-Cruz, S., & Márquez-Ríos, E. (2016). Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 558--562. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.02.007>
- Hu, H., Cheung, I. W. Y., Pan, S., & Li-Chan, E. C. Y. (2015). Effect of high intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of aggregated soybean β -conglycinin and glycinin. *Food Hydrocolloids*, 45, 102--110. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.004>
- Hu, H., Wu, J., Li-Chan, E. C. Y., Zhu, L., Zhang, F., Xu, X., Fan, G., Wang, L., Huang, X., & Pan, S. (2013). Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions. *Food Hydrocolloids*, 30(2), 647--655. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.001>
- Huang, L., Ding, X., Li, Y., & Ma, H. (2019). The aggregation, structures and emulsifying properties of soybean protein isolate induced by ultrasound and acid. *Food Chemistry*, 279(301), 114--119. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.147>
- Huang, L., Zhang, W., Yan, D., Ma, L., & Ma, H. (2020). Solubility and aggregation of soy protein isolate induced by different ionic liquids with the assistance of ultrasound. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 2277--2283. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.031>
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Lelas, V., Herceg, Z., & Herceg, I. L. (2008). Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 281--287. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.004>
- Jansens, K. J. A., Rombouts, I., Grootaert, C., Brijs, K., Van Camp, J., Van der Meeren, P., Rousseau, F., Schymkowitz, J., & Delcour, J. A. (2019). Rational Design of Amyloid-Like Fibrillary Structures for Tailoring Food Protein Techno-Functionality and Their Potential Health Implications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(1), 84--105. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12404>

- Jiang, L., Wang, J., Li, Y., Wang, Z., Liang, J., Wang, R., Chen, Y., Ma, W., Qi, B., & Zhang, M. (2014). Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black bean protein isolates. *Food Research International*, 62, 595--601. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.04.022>
- Jin, J., Ma, H., Wang, K., Yagoub, A. E. G. A., Owusu, J., Qu, W., He, R., Zhou, C., & Ye, X. (2015). Effects of multi-frequency power ultrasound on the enzymolysis and structural characteristics of corn gluten meal. *Ultrasonics Sonochemistry*, 24, 55--64. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.12.013>
- Kinsella, J. E. (1979). Functional properties of soy proteins. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 56(3), 242--258. <https://doi.org/10.1007/BF02671468>
- Krause, J. P. (2002). Comparison of the effect of acylation and phosphorylation on surface pressure, surface potential and foaming properties of protein isolates from rapeseed (*Brassica napus*). *Industrial Crops and Products*, 15(3), 221--228. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00117-0](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00117-0)
- Kusnandar, Feri. 2020. *Kimia Pangan Komponen Makro*. Jakarta: Bumi Aksara
- Leong, T., Ashokkumar, M., & Sandra, K. (2011). The fundamentals of power ultrasound -- a review, *Acoust. Aust.* (2011) ISSN 0814-6039.
- Li, H., Hu, Y., Zhao, X., Wan, W., Du, X., Kong, B., & Xia, X. (2020). Effects of different ultrasound powers on the structure and stability of protein from sea cucumber gonad. *Lwt*, October, 110403. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110403>
- Logie, J., & Milanova, R. United States Patent Application 20100063255. Canola Protein Isolate Compositions.
- Malabat, C., Ra, S., Rabiller, C., & Gu, J. (2001). <Emulsifying properties 12S.pdf>. 78(3).
- Mohammadi, V., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ebrahimi, R., & Abbasvali, M. (2014). Ultrasonic techniques for the milk production industry. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 58, 93--102. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.022>
- Molina, E., Papadopoulou, A., & Ledward, D. A. (2001). Emulsifying properties of high pressure treated soy protein isolate and 7S and 11S globulins. *Food Hydrocolloids*, 15(3), 263--269. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00023-6)
- Morales, R., Martínez, K. D., Pizones Ruiz-Henestrosa, V. M., & Pilosof, A. M. R. (2015). Modification of foaming properties of soy protein isolate by high ultrasound intensity: Particle size effect. *Ultrasonics Sonochemistry*, 26, 48--55. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.01.011>
- Morel, M. H., Dehlon, P., Autran, J. C., Leygue, J. P., & Bar-L'Helgouac'H, C. (2000). Effects of temperature, sonication time, and power settings on size distribution and extractability of total wheat flour proteins as determined by size-exclusion high-performance liquid chromatography. *Cereal Chemistry*, 77(5), 685--691. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.5.685>
- Mosenthin, R., Messerschmidt, U., Sauer, N., Carré, P., Quinsac, A., & Schöne, F. (2016). Effect of the desolventizing/toasting process on chemical composition and protein quality of rapeseed meal. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 7(1), 1--12. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0095-7>
- Muchtadi, M.S. 2010. *Teknik Evaluasi Nilai Gizi Protein*. ALFABETA. CV

- Nowacka, M., & Wedzik, M. (2016). Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Applied Acoustics*, 103, 163--171. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.011>
- O'Sullivan, J., Park, M., & Beevers, J. (2016). The effect of ultrasound upon the physicochemical and emulsifying properties of wheat and soy protein isolates. *Journal of Cereal Science*, 69, 77--84. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.02.013>
- Ohl, C. D., & Wolfrum, B. (2003). Detachment and sonoporation of adherent HeLa-cells by shock wave-induced cavitation. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects*, 1624(1--3), 131--138. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2003.10.005>
- Ozuna, C., Paniagua-Martínez, I., Castaño-Tostado, E., Ozimek, L., & Amaya-Llano, S. L. (2015). Innovative applications of high-intensity ultrasound in the development of functional food ingredients: Production of protein hydrolysates and bioactive peptides. *Food Research International*, 77, 685--696. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.10.015>
- Pankaj, & Ashokkumar, M. (2011). Theoretical and experimental sonochemistry involving inorganic systems. *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, 1--404. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3887-6>
- Phillips, O.Glyn & Williams, A.Peter. 2011. *Handbook of Food Proteins*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. ISBN-13: 978-1845697587 ISBN-10: 9781845697587
- Resendiz-Vazquez, J. A., Ulloa, J. A., Urías-Silvas, J. E., Bautista-Rosales, P. U., Ramírez-Ramírez, J. C., Rosas-Ulloa, P., & González-Torres, L. (2017). Effect of high-intensity ultrasound on the technofunctional properties and structure of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seed protein isolate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 436--444. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.042>
- Sadiah, I., Indarto, R., & Cahyana, Y. (2022). Karakteristik dan senyawa fenolik mikrokapsul ekstrak daun kelor (*Moringa oleifera*) dengan kombinasi maltodekstrin dan whey protein isolat. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 32(3), 273--282. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2022.32.3.273>
- Shanmugam, A., Chandrapala, J., & Ashokkumar, M. (2012). The effect of ultrasound on the physical and functional properties of skim milk. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 251--258. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.06.005>
- Sun, X., Zhang, W., Zhang, L., Tian, S., & Chen, F. (2020). Molecular and emulsifying properties of arachin and conarachin of peanut protein isolate from ultrasound-assisted extraction. *Lwt*, 132(July), 109790. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109790>
- Sylvester-Bradley, R.; Folkes, B.F. Cereal grains: Their protein components and nutritional quality. *Sci. Prog. Oxf.* 1976, 63, 241--263.
- Tang, C. H., Wang, X. Y., Yang, X. Q., & Li, L. (2009). Formation of soluble aggregates from insoluble commercial soy protein isolate by means of ultrasonic treatment and their gelling properties. *Journal of Food Engineering*, 92(4), 432--437. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.12.017>

- Téllez-Morales, J. A., Hernández-Santo, B., & Rodríguez-Miranda, J. (2020). Effect of ultrasound on the techno-functional properties of food components/ingredients: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104787>
- Vioque, J., Sánchez-Vioque, R., Clemente, A., Pedroche, J., Bautista, J., & Millan, F. (1999). Production and characterization of an extensive rapeseed protein hydrolysate. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(7), 819--823. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0071-x>
- Wagner, J. R., & Guéguen, J. (1999). Surface functional properties of native, acid-treated, and reduced soy glycinin. 2. Emulsifying properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(6), 2181--2187. <https://doi.org/10.1021/jf9809784>
- Wang, B., Du, X., Kong, B., Liu, Q., Li, F., Pan, N., Xia, X., & Zhang, D. (2020). Effect of ultrasound thawing, vacuum thawing, and microwave thawing on gelling properties of protein from porcine longissimus dorsi. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 104860. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104860>
- Wang, F., Zhang, Y., Xu, L., & Ma, H. (2020). An efficient ultrasound-assisted extraction method of pea protein and its effect on protein functional properties and biological activities. *Lwt*, 127(September 2019), 109348. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109348>
- Wang, J. yu, Yang, Y. ling, Tang, X. zhi, Ni, W. xi, & Zhou, L. (2017). Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar protein. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 225--233. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.018>
- Wang, Z., Zhang, C., Zhang, T., Ju, X., & He, R. (2018). Effects of acylation and glycation treatments on physicochemical and gelation properties of rapeseed protein isolate. *RSC Advances*, 8(70), 40395--40406. <https://doi.org/10.1039/C8RA07912A>
- Xiong, W., Wang, Y., Zhang, C., Wan, J., Shah, B. R., Pei, Y., Zhou, B., Li, J., & Li, B. (2016). High intensity ultrasound modified ovalbumin: Structure, interface and gelation properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 302--309. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.014>
- Yang, X., Li, Y., Li, S., Oladejo, A. O., Ruan, S., Wang, Y., Huang, S., & Ma, H. (2017). Effects of ultrasound pretreatment with different frequencies and working modes on the enzymolysis and the structure characterization of rice protein. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 19--28. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.02.026>
- Yasui, K. (2010). Fundamentals of Acoustic Cavitation and Sonochemistry. *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, 1--29. doi:10.1007/978-90-481-3887-6_1
- Zhang, H., Claver, I. P., Zhu, K. X., & Zhou, H. (2011). The effect of ultrasound on the functional properties of wheat gluten. *Molecules*, 16(5), 4231--4240. <https://doi.org/10.3390/molecules16054231>
- Zhang, Q. T., Tu, Z. C., Xiao, H., Wang, H., Huang, X. Q., Liu, G. X., Liu, C. M., Shi, Y., Fan, L. L., & Lin, D. R. (2014). Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate. *Food and Bioprocess Technology*, 92(1), 30--37. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.07.006>
- Zhang, Z., Wang, Y., Jiang, H., Dai, C., Xing, Z., Kumah Mintah, B., Dabbour, M., He, R., & Ma, H. (2020). Effect of dual-frequency ultrasound on the formation of lysinoalanine and structural characterization of rice dreg protein isolates. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67(March), 105124. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105124>

Zhou, M., Liu, J., Zhou, Y., Huang, X., Liu, F., Pan, S., & Hu, H. (2016). Effect of high intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of soybean glycinin at different ionic strengths. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 205--213. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.007>

Zhu, Z., Zhu, W., Yi, J., Liu, N., Cao, Y., Lu, J., Decker, E. A., & McClements, D. J. (2018). Effects of sonication on the physicochemical and functional properties of walnut protein isolate. *Food Research International*, 106(January), 853--861. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.060>