

Sürdürülebilir Teknoloji: Giyilebilir Biyoelektronik

Şehnaz Melisa Acar^Y, Elif Duymaz^E.

Biyoelektronik, bilgi işleme, bilgi depolama, elektronik bileşenler ve aktüatörler içeren, geniş bir yelpazede bakıldığı zaman elektronik ile bağlantılı olarak biyolojiyi temel edinen bir çalışma alanı olarak tanımlanmaktadır. Biyoelektronik, biyolojik etkileşimleri okunabilir elektronik sinyallere dönüştüren iletken bir malzeme üzerine monte edilmiş biyolojik bileşenlerle, biyomateryallerin elektronik cihazlar kullanılarak arayüzlenmesini içermektedir¹. Elektriksel stimülasyon ve nöral aktivitelerin kaydı dahil olmak üzere insan vücudu ile biyoelektronik arayüz oluşturma, günden güne gelişen sinirbilimin terapötik yaklaşımların, giyilebilir ve implante edilebilir cihazların temelini oluşturmaktadır. Mevcut olarak bulunan ve günümüzde üretilen biyoelektronik arayüzlerin çoğu, biyolojik dokularla etkileşime giren çeşitli elektrot formlarını içermektedir. Saflaştırılmış performans ve kontrole sahip elektrotlar, modern elektronikteki yenilikler ve ilerlemelerle büyük ölçüde desteklenen çok çeşitli formlarda ve boyutlarda bulunmaktadır. Bu elektrotlara dayalı olarak, insan vücudunun cilt, beyin, omurilik ve kalp gibi farklı bölgelerinde çeşitli biyoelektronik sinyalleri toplamak ve iletmek için son zamanlarda çok sayıda giyilebilir ve implante edilebilir elektronik cihaz geliştirilmiştir².

Biyolojik etkileşimlerin elektronik cihazlar kullanılarak bağlantı sağlaması biyoreaktörler,

biyosensörler, biyoyakıt hücreleri (biofuel cells, BFCs) gibi biyoelektronik cihazlarla yeni fikirler üretmek için merkezi bir bağlantı olarak görülmektedir. Bu bağlamda biyoelektronik, günden güne hızlı bir şekilde büyüyen, disiplinlerarası bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Biyoelektronik alanındaki araştırmalar, doğa ve yaşam bilimlerindeki tekniklere dayanan birçok yeni gelişmeyle birlikte, birçok disiplinin bir araya gelmesi ile desteklenmektedir³. Biyoelektronik uygulamalarda kullanılan malzemelerin altında yatan temel kimya anlayışımızdaki ilerlemeler, birçok yeni keşfin önemli bir bileşeni olmaktadır. Özellikle günümüzde, çeşitli biyokatalitik reaksiyonlar üzerine inşa edilen enzim-bazlı biyoelektronik, belirgin avantajlar sunmaktadır ve **giyilebilir biyoelektronik**in merkezini temsil etmektedir⁴.

Son zamanlarda, biyoelektronik sistemler giyilebilir teknolojilere entegre edilerek, bileklik, kol saati ve akıllı telefon gibi cihazlarla yaşamsal belirtilerin izlenmesine olanak sağlayacak şekilde kapsamı genişletilmiştir⁵. Giyilebilir enzim elektrotları sağlık, spor, çevre veya savunma gibi çeşitli alanlara heyecan verici fırsatlar sunmaktadır; ayrıca giyilebilir biyoelektroniklere olan ilginin artmasındaki ana etken, antrenmanlarını kaydedip vücut fonksiyonlarının eş zamanlı takibini yapmak isteyen sporcular gibi görünmektedir⁶.

Malzeme bilimi ve cihaz teknolojisindeki gelişmeler, esnek ve biyouyumlu yeni nesil elektroniklerin üretimini mümkün kılmıştır. Böylece, kişiselleştirilmiş sağlık cihazlarının ticarileştirilmesi giderek daha kolay hale gelmiştir. Örneğin, kullanıcılara ilişkin sağlık bilgilerini izleyen vücuda bağlı giyilebilir biyoelektronikler gerçek zamanlı olarak, insan vücuduna ait yaşamsal verilerin gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır⁷. Ek olarak, giyilebilir biyoelektroniklerin kullanımı ile; hava kirleticiler, kimyasallar ve ultraviyole ışık gibi kullanıcıyı çevresindeki zararlı faktörlerin izlenmesi de sağlığın korunması için önemlidir, çünkü bu tür faktörlerin insan vücudu üzerinde kısa ve uzun vadede zararlı etkileri bulunmaktadır⁸. İnsan vücudu ve çevresindeki kimyasalların türleri, bir kişinin sağlık durumunu belirlerken bu bilgiler ile kişisel sağlık bakımının takibi ve oluşabilecek hastalıklar için tedavi algoritması belirlenmesinde yol gösterici olacağı düşünülmektedir⁵.

Etkili giyilebilir biyoelektronik ürünlerini oluşturmak, kontrollü biyokatalitik özelliklere sahip yüksek kaliteli enzim-elektronik arayüzler, mekanik esneklik ve elektronik filmlerin geniş alanlı işlenmesi de kapsayan birtakım özelliklerin uygun bir şekilde aktarılmasını gerektirmektedir. Bu tür giyilebilir sistemler genellikle, elektrik sinyali veya biyoenerji üretmek için enzim-substrat reaksiyonunun kullanılmasına dayanmaktadır. Biyokatalitik reaksiyonların giyilebilir biyoelektronik uygulamalara uyarlanması

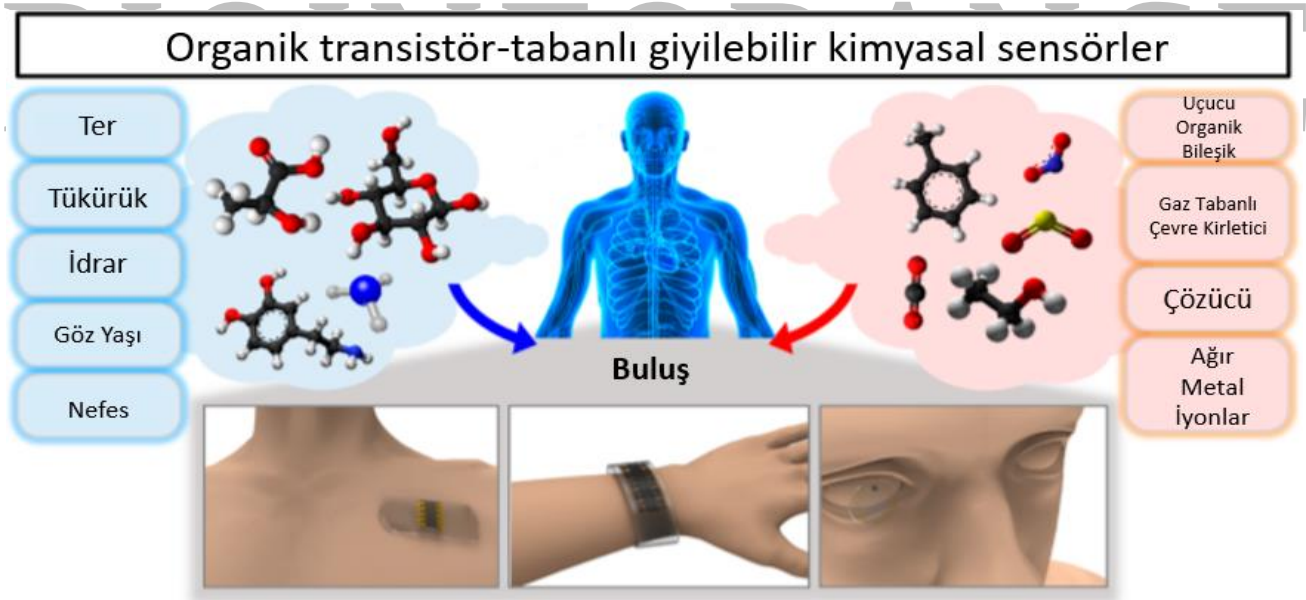
dikkate alınması gereken temel faktör, enzim-elektronik arayüzüdür⁷. Enzim tabanlı giyilebilir cihaz performansının, enzim immobilizasyonu ile belirlenen, enzimden elektrotta elektron transfer sürecine bağlı olduğu gözlenmektedir. Enzim immobilizasyon yolu, giyilebilir biyoelektroniklerin spesifik uygulamalarına bağlanmaktadır⁹.

Enzim tabanlı giyilebilir biyoelektronik cihazların yanı sıra, giyilebilir biyomedikal cihazlara uygulanması amaçlanan yumuşak biyoelektronik, malzeme bilimciler tarafından büyük ilgi görmüştür. Beyin, kalp, cilt, göz, kaslar ve nöronlar gibi çeşitli insan organları ve dokularıyla eşleşen, son derece yumuşak mekanik özelliklere sahip yumuşak biyoelektronik de gerek cihaz tasarımları gerek biyomedikal işlev çeşitlilikleri gerekse özel uygulama durumuna göre özel olarak ayarlanabilmesi nedeniyle cihaz mühendisleri ve klinisyenler tarafından günümüzde büyük ilgi görmektedir¹⁰. Yumuşak biyoelektroniklerin bu benzersiz özellikleri, biyoelektronik cihazlara entegre organ ve dokularda minimum mekanik ve biyolojik hasar oluşturmaktadır; ayrıca, uzun süreli biyoentegrasyondan sonra bile iltihaplanma, cilt tahrişi ve bağışıklık tepkileri gibi yan etkilerin azaldığı da gözlemlenmiştir. Elektronik cihazlardaki iki boyutlu (2B) malzemeler (iletkenler ve yarı iletkenler) kanallar ve elektrotlar için ortaya çıkan malzeme adaylarıdır. Yumuşak biyoelektronikte çeşitli biyosensörlere ve terapötik aktüatörlere de uygulanabilmektedirler. Katman sayısının

sentez aşamasında kontrol edilebildiği ekstra ince dikey katmanlı nano yapı ve geniş bir alanda yatay bir şekilde bulunabilen düzlemsel moleküler yapı, 2B malzemelere benzersiz mekanik, elektriksel ve optik özellikler kazandırmıştır¹¹. Atomik olarak ince nano yapı, cihazın mekanik yumuşaklığına, esnekliğine ve yüksek optik şeffaflığına izin verirken, geniş alanlı sürekli ince film yapısı, 2B düzlem içinde verimli taşıyıcı taşınmasına olanak sağlamaktadır. Ek olarak, atomik olarak ince 2B katmanlardaki kuantum hapsetme etkisi, ilginç optoelektronik özellikler ve mükemmel fotoğraf algılama yetenekleri sunmaktadır. Yumuşak biyoelektronik cihazlar üretildiğinde, 2B malzemelerin bu ilginç ve kullanışlı özellikleri, biyolojik ve optik algılamada geleneksel olmayan cihaz işlevlerinin yanı sıra elektriksel ve biyokimyasal terapötik

aktüasyonlarda üstün performans sağlamaktadır¹².

Giyilebilir elektronik cihazların temel unsurlarından biri olan organik transistör bazlı kimyasal sensörler de enzim bazlı ve yumuşak biyoelektronik kullanılan biyoelektronik cihazlar kadar gelişmeye başlamıştır. Malzeme tasarımı ve cihaz mühendisliği yoluyla organik transistör platformlarına dayalı yüksek performanslı kimyasal sensörler geliştirmek için büyük çaba sarf edilmiştir. Yeni malzemelerin sentezi, yapı mühendisliği, yüzey işlevselleştirme ve cihaz mühendisliği dahil olmak üzere, yüksek hassasiyet, seçicilik ve kararlılığa sahip kimyasal sensörler geliştirmek için çeşitli deneysel yaklaşımlar benimsenmiştir (Şekil 1)¹⁰.



Şekil 1. Sağlığa zararlı çevresel kimyasalların ve vücuttan atılan kimyasalların tespiti için organik transistör tabanlı sensörlerin giyilebilir biyoelektronik uygulamaları¹⁰.

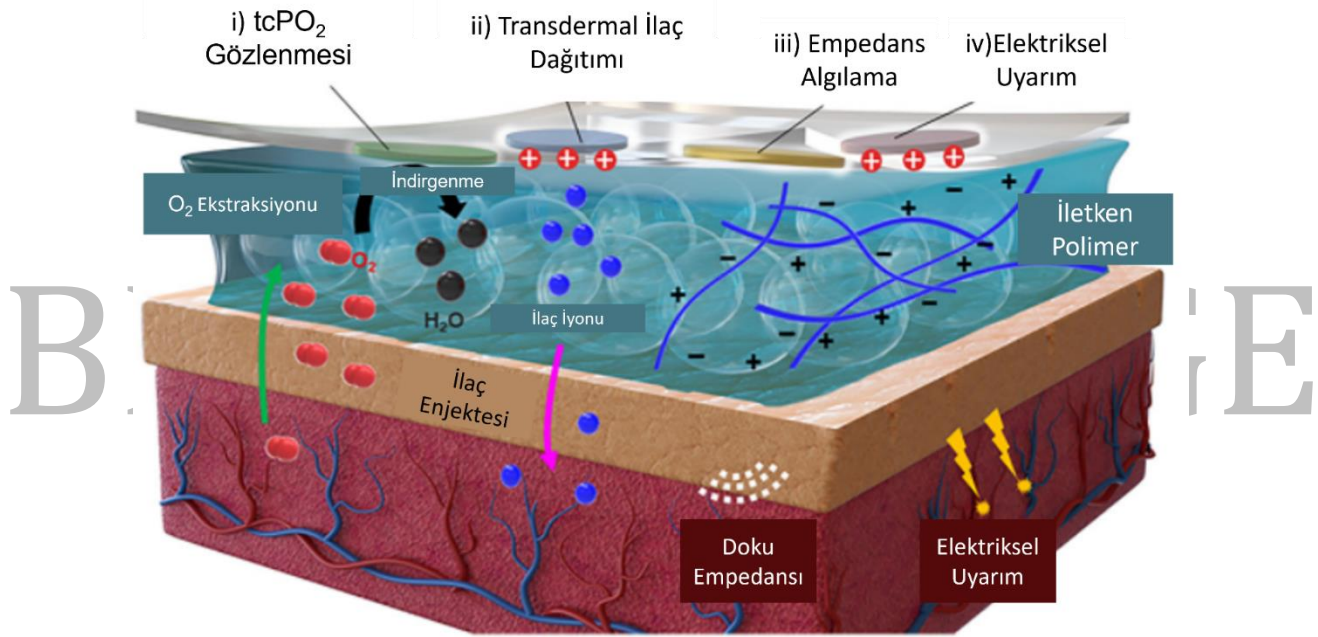
Organik elektronik malzeme alanındaki artan ilgi sayesinde, potansiyel olarak giyilebilir uygulamalar için esnek ve gerilebilir organik

sensör tasarımında farklı cihaz mimarileri benimsenmektedir. Çeşitli cihaz mimarileri arasında dirençler, transistörler,

elektrokimyasal ve diyet bazlı cihazlar yoğun olarak bulunmaktadır. Her cihaz mimarisinin farklı avantajları olsa da hepsi etkili sensörler olarak işlev görecektir şekilde tasarlanabilmektedir¹⁰.

Lim ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yayımlanan bir çalışmada, giyilebilir biyoelektronik ve insan derisi arasında doku benzeri, yarı katı bir arayüz oluşturmak için kullanılan malzemeler ve cihaz stratejileri karşılaştırılmıştır. Çapraz bağlı gözenekli bir polimer ağı ve aralarındaki boşlukları dolduran su moleküllerinden oluşan hidrojeller, insan

dokusuna benzer mekanik yapıları ve fiziksel özellikleri ile yumuşak ve nemlidir; bu yüzden doku benzeri bir ara yüz oluşturma potansiyeline sahip olduğu öngörülmüştür. Bu sebepten dolayı, Araştırmacılar çalışmalarında, yüksek kütle geçirgenliği ve düşük empetans gibi olağandışı özellikler gösteren ultra ince tipte işlevselleştirilmiş hidrojellerin cilt üzerinde sıvı bir elektrolit görevi gördüğünü belirtmiştir; ayrıca yüksek uyumlu arayüzüyle hedef moleküllerin verimli bir şekilde taşınmasını kolaylaştırdığını ifade etmiştir. (Şekil 2)¹³.



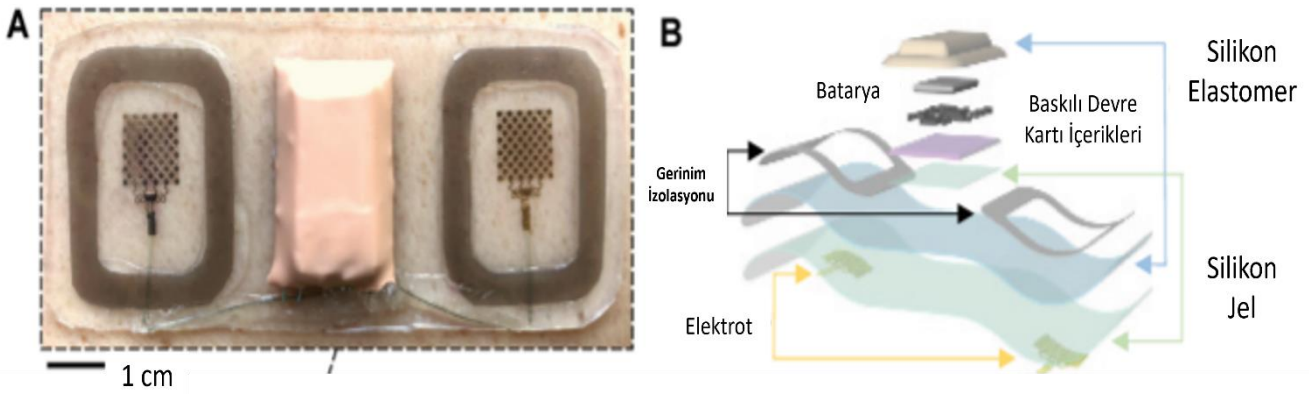
Şekil 2. Ultra yumuşak, kütle geçirgen ve düşük empedanslı bir hidrojel kullanılarak elde edilen doku benzeri cilt-cihaz arayüzü¹³. İnsan derisi ve giyilebilir biyoelektronik arasında bulunan hidrojel arayüzünün yapısı ve gereksinimleri şekilde gösterilmiştir. Örneklenen giyilebilir cihaz, tcPO2 izleme, transdermal ilaç verme, doku empedansı algılama ve elektrik stimülasyonu gibi transkutanöz biyoanaliz ve terapi için kullanılmaktadır.

Rodehaver ve arkadaşları tarafından da yakın zamanda, gerinim izolasyonlu giyilebilir yumuşak biyoelektronik sistemler için yeni bir gerinim izolasyon malzemeleri sınıfı, hibrit arayüzey fiziği ve yumuşak malzeme düzenlenmesi ile ilgili gereklilikler

raporlanmıştır. Sensöre gömülü gerinim izolasyonunun temel mekanizması, analitik ve hesaplamalı çalışmaların bir kombinasyonu ile tanımlanmaktadır ve dinamik deneylerle doğrulanmaktadır. Sert-yumuşak malzeme entegrasyonu ve izolasyon mekaniğinin

kapsamlı araştırması ile hem hafif hem de aşırı günlük aktiviteler sırasında meydana gelebilecek hareketten kaynaklanan hataları en aza indirmek için kritik tasarım özellikleri sağlamaktadır. Nefes alabilen delikli bir zar içeren kablosuz, tam entegre bir yumuşak biyoelektronik sistem, yüksek kaliteli EKG, kalp atış hızı, solunum hızı ve aktiviteler dahil olmak üzere gerçek zamanlı, sürekli fizyolojik verileri

ölçebilmektedir. Birden fazla denek ile *in vivo* gösterim ve ticari cihazlarla eş zamanlı karşılaştırma, yumuşak biyoelektronik sistemlerin olağanüstü performansını yakalamaktadır; ayrıca, abartılı vücut hareketlerinde bile günlük yaşamda art arda sekiz saat boyunca hiçbir veri kaybı olmadan kritik fizyolojik sinyallerin gerçek zamanlı sürekli izlenmesini sağlamaktadır (Şekil 3)¹⁴.



Şekil 3. Gerinim izolasyonlu yumuşak biyoelektronik tasarımına, üretimine ve mimarisine genel bakış¹⁴. **A)** Göğüste, yüksek kaliteli fizyolojik sinyalleri kaydederken çeşitli günlük aktiviteler sırasında ciltle güvenli teması koruyan kablosuz giyilebilir yumuşak biyoelektronik sistem. **B)** Ciltle temas eden elektrotlar, yumuşak substratlar, gerinim izolatörleri, çip bileşenleri ve kapsülleyiciler de dahil olmak üzere çok katmanlı cihaz yapısının şematik görünümü.

Son yıllarda yapılan çalışmalar doğrultusunda, giyilebilir biyoelektronik alanında gerçekleştirilen araştırmalar gözle görülür bir şekilde artmıştır. Bu çalışmalar, insan vücudundaki yaşamsal olayların gözlemlenmesini kolaylaştırmış ve böylece

gelecekte yapılacak olan tedavi çalışmalarının önünü açmaktadır. Giyilebilir biyoelektronik teknolojilerinin insan yaşamını kolaylaştırmak amacıyla sürdürülebilirliği açısından geleceğe yönelik çalışmalar devam etmektedir^{15,16,17}.

Referanslar:

- Gao, D., Parida, K., & Lee, P. S. (2020). Emerging Soft Conductors for Bioelectronic Interfaces. *Advanced Functional Materials*, 30(29), 1–30. <https://doi.org/10.1002/adv.m.201907184>
- Song, E., Li, J., Won, S. M., Bai, W., & Rogers, J. A. (2020). Materials for flexible bioelectronic systems as chronic neural interfaces. *Nature Materials*, 19(6), 590–603. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0679-7>
- Moser, M., Ponder, J. F., Wadsworth, A., Giovannitti, A., & McCulloch, I. (2019). Materials in Organic Electrochemical Transistors for Bioelectronic Applications: Past, Present, and Future. *Advanced Functional Materials*, 29(21), 1–15. <https://doi.org/10.1002/adv.m.201807033>
- MacChia, E., Picca, R. A., Manoli, K., Di Franco, C., Blasi, D., Sarcina, L., Ditaranto, N., Cioffi, N., Österbacka, R., Scamarcio, G., Torricelli, F., & Torsi, L. (2020). About the amplification factors in organic bioelectronic sensors. *Materials Horizons*, 7(4), 999–1013. <https://doi.org/10.1039/c9mh01544b>
- Promphet, N., Ummartyotin, S., Ngeontae, W., Puthongkham, P., & Rodthongkum, N. (2021). Non-invasive wearable chemical sensors in real-life applications. *Analytica Chimica Acta*, 1179(xxxx), 338643. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338643>
- Hubble, L. J., & Wang, J. (2019). Sensing at Your Fingertips: Glove-based Wearable Chemical Sensors. *Electroanalysis*, 31(3), 428–436. <https://doi.org/10.1002/elan.201800743>
- Song, Y., Min, J., & Gao, W. (2019). Wearable and Implantable Electronics: Moving toward Precision Therapy. *ACS Nano*, 13(11), 12280–12286. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.9b08323>
- Marquez, A. V., & Mcevoy, N. (2020). Organic Electrochemical Transistors (OECTs) toward Flexible and Wearable Bioelectronics. 1–25.
- Song, P., Yang, G., Lang, T., & Yong, K. T. (2019). Nanogenerators for wearable bioelectronics and biodevices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(2). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae44d>
- Lee, M. Y., Lee, H. R., Park, C. H., Han, S. G., & Oh, J. H. (2018). Organic Transistor-Based Chemical Sensors for Wearable Bioelectronics. *Accounts of Chemical Research*, 51(11), 2829–2838. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00465>
- Kim, J., Jeerapan, I., Sempionatto, J. R., Barfidokht, A., Mishra, R. K., Campbell, A. S., Hubble, L. J., & Wang, J. (2018). Wearable Bioelectronics: Enzyme-Based Body-Worn Electronic Devices. *Accounts of Chemical Research*, 51(11), 2820–2828. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00451>
- Wang, Q., Pan, X., Lin, C., Gao, H., Cao, S., Ni, Y., & Ma, X. (2020). Modified Ti3C2TX (MXene) nanosheet-catalyzed self-assembled, anti-aggregated, ultra-stretchable, conductive hydrogels for wearable bioelectronics. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126129. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126129>
- Lim, C., Hong, Y. J., Jung, J., Shin, Y., Sunwoo, S., Baik, S., Park, O. K., Choi, S. H., Hyeon, T., Kim, J. H., Lee, S., & Kim, D. (2021). Tissue-like skin-device interface for wearable bioelectronics by using ultrasoft, mass-permeable, and low-impedance hydrogels. May, 1–12. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3716>
- Rodeheaver, N., Herbert, R., Kim, Y., Mahmood, M., Kim, H., Jeong, J., & Yeo, W. (2021). Strain-Isolating Materials and Interfacial Physics for Soft Wearable Bioelectronics and Wireless, Motion Artifact- Controlled Health Monitoring. 2104070, 1–12. <https://doi.org/10.1002/adv.m.202104070>
- Su, Y., Chen, C., Pan, H., Yang, Y., Chen, G., Zhao, X., Li, W., Gong, Q., Xie, G., Zhou, Y., Zhang, S., Tai, H., Jiang, Y., & Chen, J. (2021). Muscle Fibers Inspired High-Performance Piezoelectric Textiles for Wearable Physiological Monitoring. *Advanced Functional Materials*, 31(19), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adv.m.202010962>

16. Ji, W., Zhu, J., Wu, W., Wang, N., Wang, J., Wu, J., Wu, Q., Wang, X., Yu, C., Wei, G., Li, L., & Huo, F. (2021). Wearable Sweat Biosensors Refresh Personalized

Health/Medical Diagnostics. Research, 2021, 1–19. <https://doi.org/10.34133/2021/9757126>

17. Yang, Y., Yang, X., Tan, Y., & Yuan, Q. (2017). Recent progress in flexible and

wearable bio-electronics based on nanomaterials. 10(5), 1560–1583. <https://doi.org/10.1007/s12274-017-1476-8>

BIOINFORANGE