YANGI MOSLASHUVCHAN SUPERKONDENSATORNING ELEKTROKIMYOVIY XUSUSIYATLARINI BAHOLASH

Shodmanov Jasur Abdumuhammadovich
Namangan davlat texnika universiteti PhD, dotsent.
E-mail: phd.shodmanov@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada polivinil spirt (PVS) va tabiiy polisaxarid – gellan saqichi (GG) asosida yaratilgan ikki tarmoqli (Double Network, DN) gel polimer elektrolit (GPE) ishlab chiqilishi va uning egiluvchan superkondensatorlarda qo‘llanilishi tahlil qilinadi. PG-10 GPE namunasi bo‘yicha o‘tkazilgan tajribaviy sinovlar natijasida ushbu material yuqori solishtirma sig‘im (198 F/g), past ichki qarshilik (0.085 Ω) va deformatsiyaga bardoshlilik xususiyatlariga ega ekanligi aniqlandi. Elektrokimyoviy tahlillar (CV, GCD, EIS) PG-10 GPE ning ideal ikki qavatli sig‘im xatti-harakatini namoyon etishini va elektrostatik energiya saqlash mexanizmining ustuvorligini tasdiqladi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, PVS/Gellan asosidagi DN-GPElar portativ energiya tizimlari, biosensorlar va kiyiladigan qurilmalar uchun istiqbolli va ekologik xavfsiz materiallar sifatida xizmat qilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: superkondensator, gel polimer elektrolit, polivinil spirt, gellan saqichi, ikki tarmoqli tuzilma, ion o‘tkazuvchanlik, egiluvchan energiya qurilmalari.

Аннотация: В данной статье рассматривается разработка и применение двухсетчатого (Double Network, DN) гелевого полимерного электролита (GPE), основанного на поливиниловом спирте (ПВС) и натуральном полисахариде — геллановой камеди (GG), для гибких суперконденсаторов. Экспериментальные испытания образца PG-10 GPE показали его высокую удельную емкость (198 F/g), низкое внутреннее сопротивление (0.085 Ω) и устойчивость к деформациям. Электрохимические анализы (CV, GCD, EIS) подтвердили идеальное поведение двойного электрического слоя и преобладание электростатического механизма накопления энергии. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности и экологической безопасности DN-GPE на основе ПВС/Геллана для использования в портативных энергетических системах, биосенсорах и носимых устройствах.

Ключевые слова: суперконденсатор, гелевый полимерный электролит, поливиниловый спирт, геллан, двойная сеть, ионная проводимость, гибкие энергосистемы.

Abstract: This article explores the development and application of a double-network (DN) gel polymer electrolyte (GPE) based on polyvinyl alcohol (PVA)

ISSN 3030-3907

and the natural polysaccharide gellan gum (GG) for flexible supercapacitors. Experimental tests of the PG-10 GPE sample demonstrated high specific capacitance (198 F/g), low internal resistance (0.085 Ω), and excellent deformation tolerance. Electrochemical analyses (CV, GCD, EIS) confirmed the ideal electric double-layer behavior and the dominance of the electrostatic energy storage mechanism. The results suggest that DN-GPEs based on PVA/Gellan are promising and environmentally safe materials for use in portable energy systems, biosensors, and wearable electronics.

Keywords: supercapacitor, gel polymer electrolyte, polyvinyl alcohol, gellan gum, double network structure, ionic conductivity, flexible energy devices.

Kirish

Global miqyosda barqaror rivojlanish strategiyalarining ajralmas tarkibiy qismi sifatida energiyani yuqori samaradorlik bilan saqlash va tezkor uzatish texnologiyalariga bo‘lgan ehtiyoj tobora ortib bormoqda. Aholi sonining ko‘payishi, shaharsozlik, raqamli texnologiyalar, aqlli qurilmalar, elektromobil sanoatidagi innovatsiyalar hamda portativ elektronika vositalarining kengayib borayotgani fonida energiya saqlash qurilmalarining ishlash samaradorligi, xavfsizligi va egiluvchanligi zamonaviy texnologik talablarga to‘liq javob berishi zarur [1].

So‘nggi o‘n yillikda superkondensatorlar (SKlar) energiya saqlash tizimlarida istiqbolli variant sifatida ko‘plab ilmiy markazlar e’tiborida bo‘lib kelmoqda. Ularning yuqori quvvat zichligi, past ichki qarshiligi, son-sanoqsiz zaryad-razryad sikllariga bardosh berishi, ekologik xavfsizligi va qisqa vaqt ichida katta hajmdagi energiyani saqlash va uzatish imkoniyati bilan ajralib turadi [2-3]. SKlarning asosiy tarkibi ikki elektrod, separator va ion o‘tkazuvchi elektrolitdan iborat bo‘lib, aynan **elektrolitning fizik-kimyoviy va elektrokimyoviy xossalari** butun qurilmaning ishlash samaradorligini belgilaydi [4].

An’anaviy superkondensatorlarda ishlatiladigan suyuq elektrolitlar (masalan, H_2SO_4, KOH, $LiClO_4$) yuqori ion o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lsa-da, ular portlash xavfi, bug‘lanish darajasining yuqoriligi, oqib ketish ehtimoli va elektrodlar bilan korroziya jarayonlari sababli amaliyotda jiddiy cheklovlarga duch kelmoqda [5]. Shu sababli, zamonaviy ilmiy izlanishlar e’tiborini yarim qattiq holatdagi **gel polimer elektrolitlar (GPElar)** tomon qaratmoqda.

GPElar polimer matritsa va ion tashuvchi tuzlardan tashkil topgan gidrofilik tizim bo‘lib, ular suyuq elektrolitlarga nisbatan yuqori ion o‘tkazuvchanlik, oqib ketmaslik, issiqlikka va kimyoviy muhitga barqarorlik, egiluvchanlik, past zaharlilik va ekologik xavfsizlik kabi ustunliklarga ega [6]. GPElar uchun asos

ISSN 3030-3907

sifatida polivinil spirt (PVS), polietilenoksid (PEO), poliviniliden ftorid (PVDF) va poliakrilamid (PAM) kabi polimerlar keng qo‘llaniladi [7-8].

Ular orasida **PVS** o‘zining gidroksil guruhlari tufayli ionlar bilan kompleks hosil qilish xususiyatiga ega bo‘lib, yuqori gidrofilikligi, toksik bo‘lmaganligi va yaxshi plyonka hosil qiluvchi qobiliyati bilan ajralib turadi [9-10]. **Gellan saqichi (GG)** esa tabiiy, arzon, toksik bo‘lmagan polisaxarid bo‘lib, K^+ kabi kationlar orqali krosslink (ionik bog‘lanish) hosil qilishga qodir. Bu esa GG asosidagi GPElarda o‘z-o‘zini tiklay olish (self-healing) xususiyati va past haroratda barqaror ishlash imkonini yaratadi [11].

Biroq, GPElarning keng tarqalishiga to‘sqinlik qilayotgan muhim omil – ularning **mexanik zaifligi** va cho‘zilishdagi bardoshlilik darajasining pastligidir. Aynan shu kamchilik ularning egiluvchan elektronika va kiyiladigan qurilmalardagi qo‘llanish doirasini cheklaydi [12]. Adabiyotlarda mexanik mustahkamlikni oshirish uchun bir nechta metodlar taklif qilingan: *sliding-ring* tuzilma, *gidrofobik assotsiatsiya*, *ionik bog‘lanishlar*, *mikrozarracha mustahkamlash* va eng muhimi, **ikki tarmoqli tuzilma (Double Network, DN)** texnologiyasi [13].

DN tuzilma ikki xil xususiyatga ega polimer zanjirlarini (qattiq/mo‘rt va yumshoq/egiluvchan) birlashtirish orqali hosil qilinadi. Bu yondashuv bir vaqtning o‘zida yuqori mexanik barqarorlik va elastiklikni ta’minlaydi. Shu asosda PVS/Gellan asosidagi ikki tarmoqli gel polimer elektrolitlar yordamida egiluvchan superkondensatorlar ishlab chiqish, ularning turli ish sharoitlarida (past harorat, egilish, yuqori tok tezligi) elektrokimyoviy va mexanik barqarorligini baholash, hamda ularni portativ energiya qurilmalari uchun innovatsion yechim sifatida asoslash.

PVS/Gellan asosidagi DN-GPE ishlab chiqilib, superkondensator qurilishida sinovdan o‘tkazildi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, **PG-10 GPE namunasi asosida tayyorlangan SKlar 198 F/g sig‘im, 0.085 Ω ichki qarshilik, -40°C gacha haroratda ishlash barqarorligi** va **230° egilish burchagida ham elektrokimyoviy faoliyatni saqlab qolish** ko‘rsatkichlarni namoyon qildi.

2. Metodlar

Ushbu tadqiqotda ikki tarmoqli (Double Network, DN) struktura asosida tayyorlangan gel polimer elektrolitlar (GPElar) yordamida egiluvchan superkondensator namunasi ishlab chiqildi. Gel strukturasini hosil qilish uchun polimer matritsa sifatida polivinil spirt (PVS) tanlab olindi. PVS o‘zining gidrofilik tabiati, yuqori ion o‘tkazuvchanligi, toksik bo‘lmaganligi va yaxshi plyonka hosil qiluvchi xususiyati va mexanik bardoshlilikka ega bo‘lib, kompozitsion gidrogel tuzilmasining yaxlitligini ta’minlaydi. Tabiiy komponent sifatida gellan saqichi (GG) ishlatildi. GG K^+ ionlari orqali o‘zaro bog‘lanish

ISSN 3030-3907

(crosslinking) hosil qilib, gel strukturasini mustahkamlaydi va elektroaktiv ion o‘tkazuvchanlikni oshiradi.

GPE namunasi quyidagi texnologik bosqichlarda tayyorlandi: PVS eritmasi (10 wt%) 90°C haroratda eritilib, GG bilan aralashtirildi. Eritmaga bog’lovchi sifatida Irgacure 2959 (0.1 wt%) qo‘shilib, bir hil massa hosil qilindi. Ushbu aralashma maxsus qolipga quyilib, 20 soat -4 °C xaroratda muzlatildi, 4 soat davomida hona xaroratida eritildi, ushbu sikl 5 marta tokrorlandi va keyingi elektrokimyoviy tahlillarga yuborildi.

Elektrod materiali sifatida aktivlashtirilgan uglerod (AC), asetilen qora (conductive carbon black) va politetrafloroetilen (PTFE) emulsiyasi (60 wt%) ishlatildi. 80:10:10 nisbatda tayyorlangan aralash etanol bilan homogenlashgan holda zanglamaydigan nikel qog’ozga bir qatlamli shaklda surildi. Tayyor elektrodlar xona haroratida quritildi va mikrotarozi yordamida aniq og‘irligi o‘lchandi. Ikki elektrod oralig‘iga DN-GPE elektroliti joylashtirilib, superkondensator tuzilmasi sendvich shaklida yig‘ildi.

Elektrokimyoviy xossalarni baholash uchun uch asosiy usul – siklik voltammetriya (CV), galvanostatik zaryad-razryad (GCD) va elektroximpedans spektroskopiya (EIS) qo‘llanildi. CV o‘lchovlari Prostat CH Instruments qurilmasida 10 dan 100 mV/s gacha bo‘lgan skanerlash tezliklarida o‘tkazildi. Potensial oynasi −0.1 V dan +1.0 V gacha bo‘lib, tok va zaryad-razryad egri chiziqlari asosida elektrod materiallarning kapasitansi aniqlanib, sig‘im quydagi formula yordamida hisoblandi:

$$C = \frac{I}{s*m} \qquad \text{formula-1}$$

bu yerda:
C- solishtirma sig‘im (F/g),
I- tok (A),
s- skanerlash tezligi (V/s),
m- elektrod massasi (g).

Galvanostatik zaryad-razryad (GCD) sinovlari doimiy tok rejimida 0.05 A/g dan 1.5 A/g gacha bo‘lgan oraliqda o‘tkazildi. Zaryad va razryad vaqti asosida quyidagi formulalar bilan sig‘im, energiya va quvvat aniqlandi:

$$C = \frac{I*\Delta t}{\Delta V}; \qquad E = \frac{1}{2}C * V^2; \qquad P = \frac{E}{\Delta t}; \quad \text{formula-2}$$

bu yerda:
ΔV- potentsial oynasi (V),
Δt- vaqt (s).

Elektroimpedans spektroskopiya (EIS) tahlillari 100 kHz dan 0.01 Hz gacha bo‘lgan chastotalarda 5 mV amplitudada amalga oshirildi. Nyquist diagrammalari

ISSN 3030-3907

asosida ichki qarshilik (Rs), zanjirli kontakt qarshilik (Rct) va ion diffuziyasiga tegishli Warburg elementi (W) qiymatlari aniqlandi. EIS tahlili yordamida GPE elektrolitlarining elektrodlar bilan interfeysdagi qarshilik darajasi baholandi.
EIS asosiy impedans ifodasi quydagicha:

$$Z(\omega) = Z'(\omega) * jZ''(\omega)$$ formula-3,

bu yerda:
Z'- real qarshilik,
Z''- xayoliy qarshilik,
$\omega=2\pi f$-burchak chastotasi.

3. Natija va muhokama.

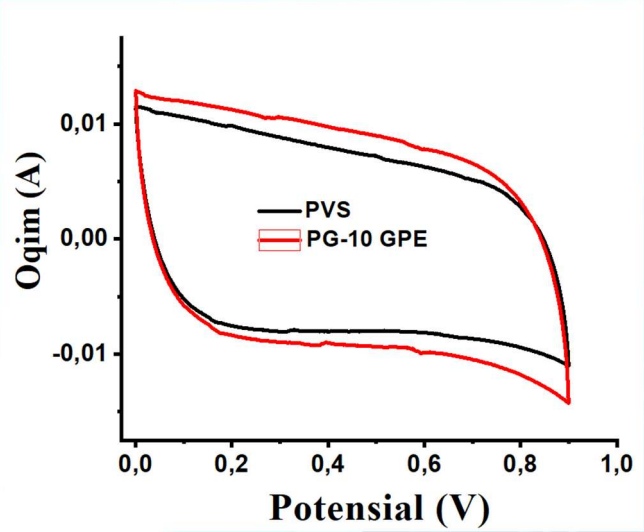
Superkondensator simmetrik konfiguratsiyada yig‘ilib, elektrod materiali sifatida yuqori sirt maydoniga va yuqori elektr o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan aktivlashgan ugleroddan foydalanildi. Konstruktsiyada ikkita faol elektrod orasiga elektrolit namunasi sendvich shaklida joylashtirildi. Ushbu tuzilma superkondensatorni elektrokimyoviy sinovlardan o‘tkazish jarayonida yuqori sig‘im, past ichki qarshilik va barqaror zaryad-razryad xususiyatlarini namoyon etishiga imkon berdi. Shuningdek, mazkur dizayn superkondensatorning turli xil deformatsiya sharoitlarida sinovdan o‘tkazilishiga ham imkon yaratdi.

Sinovlar davomida turli xildagi elektrolit namunalari, jumladan sof PVS, sof gellan hamda PVS/Gellan asosida tayyorlangan PG-10 GPE tahlil qilindi va ularning superkondensator samaradorligiga ta’siri o‘rganildi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, PVS/Gellan asosida tayyorlangan GPE namunalarining elektrokimyoviy xususiyatlari elektrolit konsentratsiyasiga bog‘liq ravishda o‘zgarib boradi. Ayniqsa, PG-10 GPE namunasi yuqori ion o‘tkazuvchanligi va kichik ichki qarshiligi bilan ajralib turdi.

Superkondensatorning elektrokimyoviy xususiyatlari siklik voltammetriya (CV), galvanostatik zaryad-razryad (GCD) va elektroximyoviy impedans spektroskopiyasi (EIS) usullari yordamida aniqlangan. Xususan, sof PVS asosidagi GPE va PG-10 GPE dan tayyorlangan superkondensatorlarning s**iklik voltammetriya (CV)** natijalari 1-rasmda keltirilgan bo’lib, sof PVS va PG-10 GPE asosidagi superkondensatorlarning siklik voltampermetriya (CV) sinovlari natijalari keltirilgan bo‘lib, ular 10 mV/s skanerlash tezligida olingan. Grafik tahlili shuni ko‘rsatdiki, har ikkala superkondensatorning CV egri chiziqlari deyarli to‘rtburchak shaklga ega bo‘lib, bu ularning ideal holatga yaqin ekanligini tasdiqlaydi. Shuningdek, elektrod va elektrolit interfeysi mavjudligi hamda elektrostatik energiya saqlash mexanizmi ustunlik qilishini ko‘rsatadi. CV egri chiziqlarida hech qanday aniq redoks piku kuzatilmagani ikki qavatli sig‘im

ISSN 3030-3907

mexanizmining ustuvorligini tasdiqlaydi. E'tiborga loyiq jihati shundaki, PG-10 GPE namunasi uchun olingan CV egri chiziqlari PVS asosidagi GPE ga nisbatan kattaroq maydonni qamrab olgan bo'lib, bu PG-10 GPE elektrolitining sig'imi yuqoriroq ekanligini va superkondensatorning energiya saqlash imkoniyatlarini yaxshilashga xizmat qilishini ko'rsatadi.

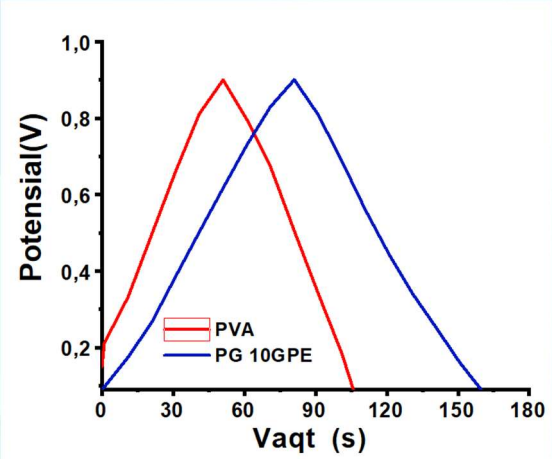


1-rasm. Namunalarning siklik voltammetriya (CV) egri chiziqlari orqali elektrokimyoviy xususiyatlarini ifodalash

Galvanostatik zaryad-razryad (GCD) sinovlari 0.05 A/g dan 1.5 A/g gacha bo'lgan tok zichligida o'tkazildi. PG-10 GPE asosidagi superkondensator 0.05 A/g tokda 198 F/g sig'im ko'rsatdi, bu PVS asosidagi GPE (137 F/g) ga qaraganda ancha yuqori. Tok zichligi 1.5 A/g gacha oshirilganida ham, sig'im 185 F/g ga kamaydi (ya'ni dastlabki qiymatning 94%ini saqlab qoldi), bu esa qurilmaning yuqori tezlikda ishlashga mosligini ko'rsatadi.

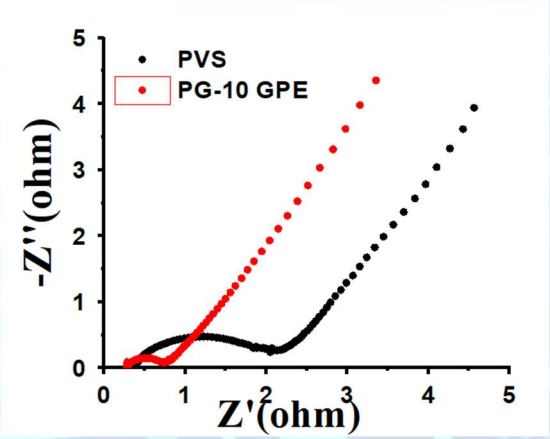
Superkondensator (SK) namunalarning sig'imini aniqlash maqsadida har ikkala namunada galvanostatik zaryadlanish-razryadlanish (GCD) tajribalari o'tkazdik. Sinovlar doimiy oqim rejimida, 0.5 A/g tok zichligida amalga oshirilib, hisob-kitoblar ikkinchi yuqorida keltirilgan 2-formulalar asosida bajarildi. Olingan eksperimental natijalar shuni ko'rsatdiki, GPE-10 asosida tayyorlangan superkondensatorning sig'imi 198 F/g ni tashkil etib, bu sof PVS GPE asosidagi superkondensatorning sig'imi (137 F/g) bilan solishtirilganda ancha yuqori ekanligi aniqlandi. Shu bilan birga, GPE-10 namunasi qisqaroq zaryadlanish va razryadlanish vaqti bilan ajralib turdi, bu esa uning tezkor energiya almashinuvi uchun qulay ekanligini ko'rsatadi. Grafik tahlillari shuni tasdiqlaydiki, har ikkala namunaning ichki qarshiligi juda past bo'lib, bu superkondensatorning uzoq muddatli barqaror ishlashiga va samarali energiya saqlash tizimi sifatida qo'llanishiga imkon yaratadi.

ISSN 3030-3907



2- rasm. Namunalarning zaryadlanish/razryadlanish sinov natijalari

Elektroimpedans spektroskopiya (EIS) natijalarida PG-10 GPE namunasi 0.085 Ω ichki qarshilikka ega bo‘lib, bu PVS asosidagi GPE (0.22 Ω) dan sezilarli darajada past. Bu esa ionlarning elektrolit orqali samarali harakatlanishini va elektroximyoviy jarayonlarda kamroq yo‘qotishlar kuzatilishini ko‘rsatadi.



Olib borilgan tadqiqot natijalari PVS va gellan saqichiga asoslangan ikki tarmoqli (DN) gel polimer elektrolit (PG-10 GPE) namunasi yuqori elektrokimyoviy samaradorlikka ega ekanligini ko‘rsatdi. Ayniqsa, superkondensatorda ushbu elektrolitdan foydalanish natijasida 198 F/g gacha solishtirma sig‘im, 0.085 Ω ichki qarshilik va deformatsiyaga yuqori bardoshlilik kabi muhim xususiyatlar kuzatildi. Siklik voltammetriya (CV) sinovlarida ideal ikki qavatli sig‘im egri chiziqlari, galvanostatik zaryad-razryad (GCD) sinovlarida yuqori energiya saqlash ko‘rsatkichlari va EIS tahlilida past impedans qiymatlari DN-GPE strukturaning samaradorligini isbotladi.

Shu asosda, PVS/Gellan asosidagi DN-GPElar nafaqat elektrokimyoviy, balki mexanik barqarorlik jihatdan ham afzalliklarga ega bo‘lib, egiluvchan va portativ energiya saqlovchi qurilmalar, biosensorlar hamda ekstremal sharoitlarda ishlovchi aqlli texnologiyalar uchun istiqbolli va ekologik xavfsiz materiallar sifatida baholanishi mumkin.

ISSN 3030-3907

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Simon, P., & Gogotsi, Y. (2020). Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials*, 19(11), 1151–1163.
2. Zhang, L. L., & Zhao, X. (2020). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 48(2), 202–268.
3. Wang, X., Zhi, C., & Bando, Y. (2015). A new approach to fabricate high-performance supercapacitor electrodes. *Polymer Reviews*, 55(1), 57–88
4. Armand, M., & Tarascon, J.-M. (2008). Building better batteries. *Nature*, 451(7179), 652–657. https://doi.org/10.1038/451652a
5. Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2021). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. Wiley.
6. Fan, L., Zhang, Y., Wang, C., & Yang, J. (2019). Gel polymer electrolytes for energy storage devices. *Electrochimica Acta*, 314, 317–326.
7. Mecerreyes, D. (2020). Polymeric ionic liquids: Broadening the properties and applications of polyelectrolytes. Progress in Polymer Science, 103, 101232.
8. Kim, D. W., et al. (2016). Highly flexible and stretchable solid-state supercapacitors using gel polymer electrolytes. *Journal of Power Sources*, 334, 196–205.
9. Gray, F. M. (2004). *Solid Polymer Electrolytes: Fundamentals and Technological Applications*. Wiley-VCH.
10. Ion cross-linked double network gellan gum gel polymer electrolyte for flexible supercapasitors, J Shodmanov, A Boymirzaev, Sciences of Europe, europe-science.com
11. Fedorov, M. V., & Kornyshev, A. A. (2019). Ionic liquids at electrified interfaces. *Chemical Reviews*, 114(5), 2978–3036.
12. Compressible and bendable highly flexible double network gel polymer electrolytes for supercapasitors. J A Shodmanov, A S Boymirzaev - Theoretical & Applied Science, 2021
13. Gong, J. P., Katsuyama, Y., Kurokawa, T., & Osada, Y. (2003). Double-network hydrogels with extremely high mechanical strength. *Advanced Materials*, 15(14), 1155–1158.

ISSN 3030-3907