

Elektroenerģija no gaisa mitruma

Avots: Dreamstime



Kurts Švarcs

Hidrofobās virsmas un ūdens kondensācija

Pagājušā gadsimta 70. gados ievērojamas vācu botānikis un virsmas fiziķis Bonnas Universitātes profesors **Vilhelms Bārtlots** (*Wilhelm Barthlott*, dzimis 1946. gadā), aplūkojot ūdens pilienu veidošanos un atgrūšanu no Indijas svētā zieda – lotosa (*Nelumbo nucifera*) lapām, atklāja virsmu pašatīrišanās spēju. Ūdens atgrūšanos no virsmas jeb hidrofobiju pēcāk novēroja arī uz daudzu citu augu lapām (1. att.). Analizējot ūdens pilienu mijiedarbību ar virsmu (adhēziju) un mijiedarbību ūdens pilienos (kohēziju), Bārtlots varēja izskaidrot slapinošo (hidrofilo) un atgrūdošo (hidrofobo) virsmu īpašibas. Neslapinošas (hidrofobas) virsmas, atgrūžot ūdens pilienus, veic arī virsmas tīrišanu. Šos efektus Bārtlots un citi pētnieki ieteica izmantot praksē tikai pagājušā gadsimta astoņdesmitos gados, taču mūsdienās to pielietojums ir būtiski paplašinājies līdz ar nanokatalizatoriem, kas tiek izmantoti gan virsmas īpašību modifikācijai, gan dažādiem katalīzes procesiem (sk. [1]).

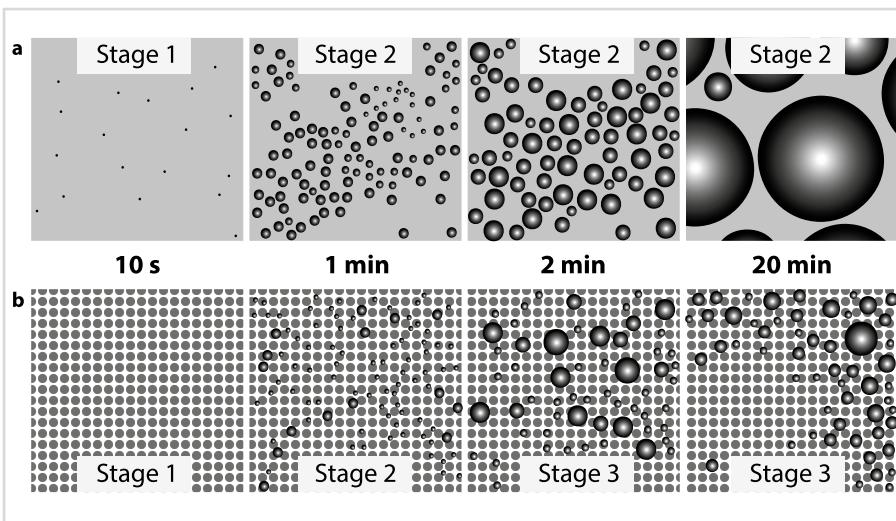
Adhēzijas procesi uz atšķirīgu struktūru virsmām un



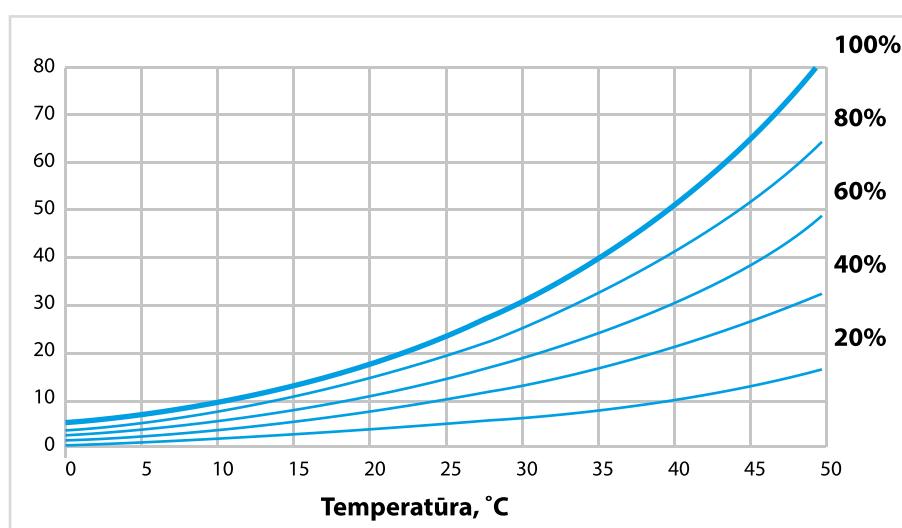
Avots: Wikimedia Commons

1. attēls. Ūdens pilienu atgrūšanās ir novērojama uz daudzu augu lapām. Šo procesu analīze veicināja nanokatalizatoru izstrādi. Attēlā redzama ūdens piliena atgrūšanās no *Salvinia molesta* lapas virsmas

nanokatalizatori ir daudzu zinātniskās pētniecības grupu uzmanības centrā. Virsmas hidrofobās īpašības pastiprinās nanostrukturētā virsmā, un šādas virsmas sauc par superhidrofobām (angļu val. *superhydrophobic surfaces*). Ūdens pilienu saplūšanas procesi uz dažādām virsmām ilustrēti



2.attēls. Ūdens pilienu veidošanās uz hidrofobām virsmām: a - uz gludas virsmas; b - uz negludas virsmas, kur mikrokapilāri ir redzami. Abas virsmas ir horizontāli orientētas. Kondensācijas procesa posmi (Stage 1 – 3) raksturo sākotnējo pilienu veidošanos (koaliscenci), pilienu saplūšanu un mobilos pilienus [2]



3.attēls. Ūdens tvaika daudzums atmosfērā (gramos uz kubikmetru, g/m³) pie atšķirīga relatīvā mitruma (% norādīti pie līknēm) atkarībā no temperatūras. Relatīvais gaisa mitrums atmosfērā raksturo reālo ūdens tvaika daudzumu procentos attiecībā pret maksimāli iespējamo pie dotās temperatūras. Līkne 100% atbilst piesātinātā ūdens tvaika daudzumam

2.attēlā. Elementārie mijiedarbības procesi ar hidrofobām virsmām ir gana sarežģīti un līdz galam nav noskaidroti. Eksperimenti liecina, ka ūdens pilienu kondensācija un pilienu veidošanās efektīvāk notiek uz gludas virsmas ar nanometrisku struktūru [2].

Ūdens kondensācija ir vērojama daudzās mūsu ikdienas norisēs. Atmosfērā pie temperatūras pazemināšanās mēs vērojam miglu. Ja vēsā laikā pēc pastaigas ienākam siltā istabā, apraso brilles. Vēsās dienās apraso arī automašīnu un dzīvokļu logi. Visas šīs parādības saistās ar atmosfēras ūdens tvaiku kondensāciju. Gaisa mitrums Zemes atmosfērā veidotikai 0,4% no visa atmosfēras tilpuma, turklāt ūdens tvaiks pamatā koncentrējas zemākajos atmosfēras slāņos ar vidējo koncentrāciju 1,3%. Tomēr kopumā tas veido trīspadsmit-tūkstoš miljardus tonnu ($1,3 \times 10^{13}$ t)! Absolūto mitrumu raksturo ūdens tvaiku daudzums gramos vienā kubikmetrā gaisa

(g/m³, 3.att.). Šī vērtība var mainīties amplitūdā no minimālās (pie 0 °C) līdz maksimālajai (piesātinātā ūdens tvaika daudzuma atmosfērā pie dotās temperatūras, 3.attēlā līkne 100%) atkarībā no atmosfēras temperatūras un atrašanās vietas (telpās, ūdens tuvumā, tuksnesi u.c.). Relatīvais mitrums raksturo absolūto ūdens tvaiku daudzumu gaisā (%) pret maksimāli iespējamo (piesātinātā ūdens tvaika spiediena) pie dotās temperatūras. Piemēram, pie relatīvā mitruma 80% 25 °C temperatūrā ūdens tvaiku daudzums vienā kubikmetrā gaisa ir 20 grami, kas veido 80% no maksimāli iespējamā (3.att.). Ūdens tvaiku kondensācijas procesā izdalās energija, kas vienlīdzīga iztvaikošanas energijai (ΔQ) pie dotās temperatūras (pie vārišanās punkta 100 °C un normālā spiedienā $\Delta Q = 2260 \text{ kJ/kg}$).

Tālākie pētījumi par ūdens kondensāciju hidrofobos materiālos atklāja negaidītus enerģijas transformācijas procesus.

Elektroenerģija no atmosfēras mitruma

Vides aizsardzībā svarīga loma ir videi nekaitīgiem energijas avotiem. Saskaņā ar 2018. gada datiem videi nekaitīgo elektroenerģijas avotu īpatsvars visā pasaule bija 26%; no tiem hidroenerģija veidoja 16%, vēja enerģija – 4,8% un saules baterijas – ap 2%. Elektroenerģijas iegūšana no gaisa mitruma varetu būt jauns būtisks ieguldījums šajā jomā. Jau vairākus gadus notiek intensīvi pētījumi, kā no atmosfēras mitruma iegūt lētu elektroenerģiju, turklāt jāatzīmē, ka vairāku pasaules valstu zi-

nātniskajos centros šie pētījumi tiek veikti dažādos virzienos un ar acīmredzamu konkurences elementu [3, 4, 5].

Pirmos soļus spēra Masačūsetsas Tehnoloģiju institūta (MTI) zinātnieku grupa profesora **Nenada Miljkoviča** (Nenad Miljkovic) vadībā [3]. Miljkoviča grupa pirmā novēroja lādētu ūdens pilienu veidošanos uz hidrofobās virsmas un izsviešanu no tās. Izmērītais lādiņu lielums bija 10 – 100 fC, kas atbilst aptuveni 60 līdz 600 tūkstošiem elektronu lādiņu (femtokulons (fC) ir 10^{-15} kuloni (C), elektrona lādiņš $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$). MTI pētnieki šo procesu izmantoja elektroenerģijas ģenerēšanai. Saviem eksperimentiem viņi izmantoja slēgtu kameru ar kondensatoru (plakņu laukums ap 20 cm²; attālums starp plāksnēm 2,7 mm, 4.att.) ar divām dažādām virsmām: hidrofobu (neslapinošu) vara oksīdu (CuO) un hidrofilu (slapinošu) vara (Cu). Hidrofobo CuO virsmu ieguva, oksidējot tīru

vara plāksni (CuO katalizatora slāņa biezums bija 300 nm). Eksperimentiem izmantoja kondensatora sērijas slēgumu ar 28 elementāriem kondesatoriem, kas paaugstināja spriegumu un atviegloja mērījumus. Lai notiku mitruma kondensācija, CuO virsmas temperatūrai jābūt zemākai par apkārtējo atmosfēras temperatūru – to panāca ar ūdens dzesēšanu līdz 8 °C. Eksperimentus veica slēgtā kamerā ar ūdens tvaika spiedienu 2000 Pa, kas atbilst ūdens tvaika spiedienam atmosfērā pie 85% relatīvā gaisa mitruma 25 °C temperatūrā (normālais atmosfēras spiediens ir aptuveni simtūkstoš paskāli, 10^5 Pa). Eksperimentālī novēroja 15 voltu spriegumu (starp viena kondesatora plāksnēm spriegums bija ap 0,5 V) un $1,15 \text{ nanoampēru}$ strāvu, kas atbilda jaudas blīvumam $15 \times 10^{-15} \text{ vati}$ uz vienu kvadrātcentimetru (15 W/cm^2). Tā ir ļoti niecīga jauda, kuru eksperimenta autori turpmāk grib palielināt. Šie rezultāti demonstrē inženierijas iespējas elektroenerģijas ieguvei no atmosfēras [3]. Autori uzsver, ka sprieguma ģenerēšana iespējama arī pie zema (10 līdz 20%) relatīvā gaisa mitruma, kas atbilst tuksnesīainiem apgabaliem. Miljkoviča grupas zinātnieki pirmie eksperimentālī novēroja, ka gaisa mitrums (ūdens tvaiki) mijiedarbibā ar dzesēto CuO nanostrukturēto virsmu spontāni inducē spriegumu un strāvu. Par savu atklājumu Miljkovičs teica: "Atmosfēra ir milzīgs mitruma avots, un viss, kas mums nepieciešams, ir temperatūras starpība starp gaisu un iekārtu." Jāatzīmē, ka šiem pielietojumiem ir ierobežojumi – pie temperatūrām zem nulles (0 °C) šādi procesi nav iespējami.

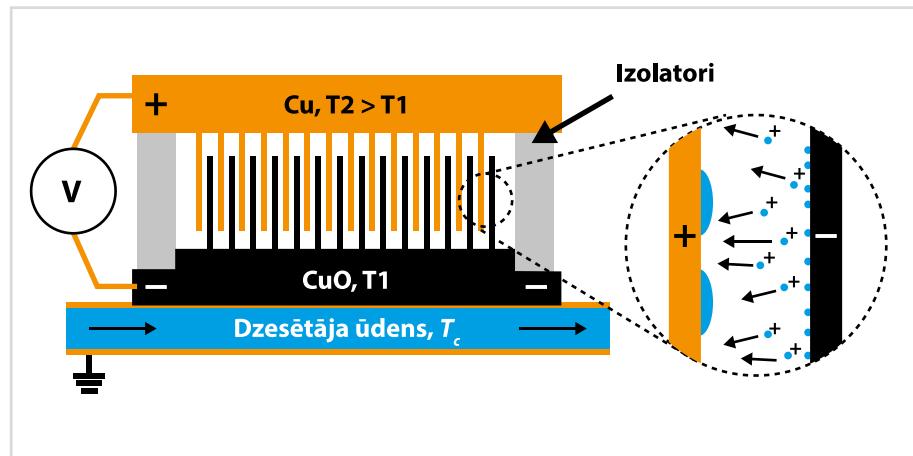
Nedaudz vēlāk sprieguma un strāvas ģenerēšanu ar grafēna oksīda katalizatoru ieguva Cinhua (*Tsinghua*) Universitātes (Ķīna) zinātnieku grupa jauna, talantīga fizikā **Huhu Čena** (*Dr. Huhu Cheng*) vadībā [4]. Atšķirībā no Miljkoviča grupas, kīniešu zinātnieki izmantoja klasisku kondensatoru ar zelta elektrodiem un plānu hidrofobā materiāla pildījumu (5. att.). Panākumu kīla bija jauns, efektīvs grafēna oksīda katalizators, kuru Čens ar līdzstrādniekiem pētīja vairākus gadus. Čena grupa savos pētījumos mācījās no dzīvās dabas un grafēna oksīda plānām kārtīnām piemēroja dzīvo šūnu membrānu anizotropās īpašības, kurās ir atšķirīgas šūnas iekšpusē (pret citoplazmu) un ārpusē. Tādējādi Čens izstrādāja oriģinālu tehnoloģiju slāņainā anizotropā porainā grafēna oksīda membrānu (angļu val. *asymmetric porous graphene oxide membrane*) a-GOM sintēzei:

1) biezākais augšējais slānis ir homogēns grafēna oksīds (GO);

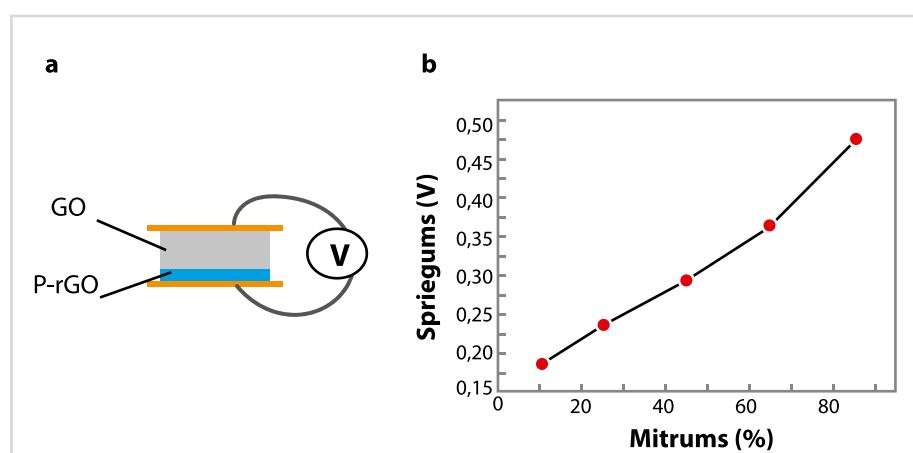
2) plānākais apakšējais slānis ir dalēji reducēts grafēna oksīds (angļu val. *partially thermally reduced graphene oxide*) P-rGO.

Minimālais kopējais slāņu biezums ir tikai 120 mikrometri, turklāt augšējais GO slānis ir ap $100 \mu\text{m}$ un apakšējais P-rGO slāņa biezums $15 - 20 \mu\text{m}$. Šāds slāņainais katalizators kondensatorā ar zelta elektrodiem (plākšņu laukums 4 mm^2) pie apkārtējā gaisa mitruma 85% spontāni inducēja 0,47 V spriegumu un $0,2 \mu\text{A}$ strāvu, kas atbilst jaudas blīvumam $2 \mu\text{W/cm}^2$ (5. att.). Inducēto elektroenerģiju novēroja vairāk nekā 100 stundas.

H. Čena grupas pētījumi atklāja elektroenerģijas ģenerēšanās mehānismu. Katalizatora augšējais GO slānis saista (absorbē) gaisa ūdens molekulās, kuras disociējas ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}^+$) un rada brīvus kustīgus ūdeņraža jonus (H^+ joni ir



4. attēls. Eksperimentālā iekārta ar kondensatoru sērijas slēgumu elektroenerģijas iegūšanai no ūdens tvaika (kondensatora plāksnes balstās uz izolatoriem). Ūdens molekulās kondensējas uz superhidrofobās (neslapinošās) CuO virsmas (melnhā krāsā), veido lādētus ūdens pilienus, kas tiek izsviesti no virsmas (sk. apli attēla labajā pusē). Pozitīvi lādētie ūdens pilieni veido lādiņu gradientu un inducē strāvu. CuO virsma tiek dzesēta līdz $T_1 = 8^\circ\text{C}$ (dzesētā ūdens temperatūra ir $T_c = 7^\circ\text{C}$). Ūdens pilieni saplūst uz slapinošās vara virsmas (Cu oranžā krāsā) un atkal iztvaiko (Cu virsma temperatūra T_2 ir apkārtējās vides temperatūra 20°C). Process notiek slēgtā kamerā pie ūdens tvaika spiediena 2000 Pa, kas atbilst ūdens tvaika spiedienam atmosfērā pie 85% relatīvā mitruma. Eksperimentā novēroja 15 V spriegumu (28 elementāro kondensatoru sērijas slēgumā) un strāvu $1,15 \text{ nA}$ ($1\text{nA} = 10^{-9}\text{A}$) [3]



5. attēls. Elektroenerģijas iegūšana no atmosfēras mitruma ar slāņaino anizotropo porainā grafēna oksīda membrānu a-GOM, kas sastāv no homogēna grafēna oksīda GO (biezākais slānis) un dalēji reducētā grafēna oksīda P-rGO (plānākais slānis): a – kondensatora shēma ar a-GOM slāniem; b – inducētā sprieguma (voltos, V) atkarība no atmosfēras relatīvā mitruma. Pie relatīvā gaisa mitruma 85% inducētais spriegums ir 0,47 V [4]

ūdeņraža atoma kodoli – protoni), kuri tiek virzīti uz apakšējo P-rGO slāni un veido protonu koncentrācijas gradientu. Šī gradiента elektriskais lauks ir inducētā sprieguma un strāvas avots [4].

H. Čena grupa izstrādāja arī baterijas gaismas diožu (LED) un digitālā pulksteņa barošanai. Izmantojot sērijas slēgumu ar 60 elementiem, pētnieki konstruēja kompaktu bateriju (vienu eiro monētas lielumā!) ar 11 voltu spriegumu. H. Čena izstrādātajam paņēmienam ar kondensatora tilpuma pildījumu ir priekšrocības salīdzinājumā ar Miljkoviča kondensatoru, kaut gan abiem ir vienādi ierobežojumi atmosfēras mitruma un temperatūras ziņā. Katrs autors uzsver savas prioritātes elektroenerģijas iegūšanai no tilpuma katalizatoriem [4].

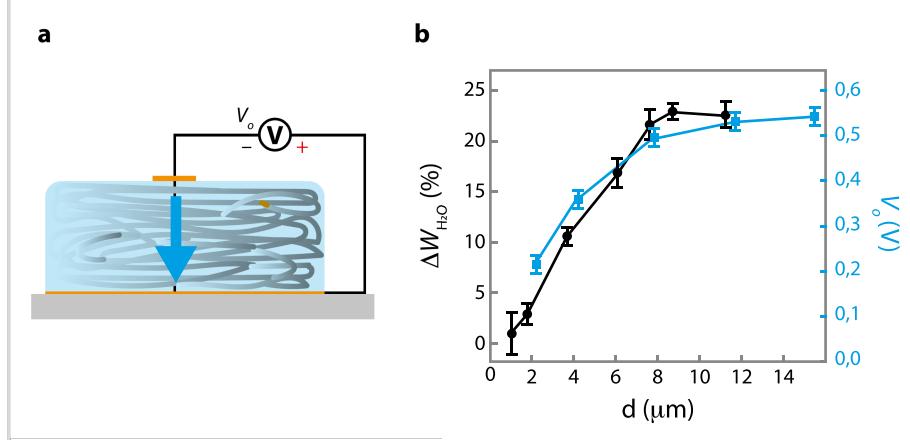
Līdzīgus rezultātus šajā jomā guvusi arī Masačūsetas Universitātes Amherstā zinātnieku grupa profesora **Jūna Jao** (*Jun Yao*) vadībā. Šī grupa izstrādāja jaunu elektrisko ģeneratoru *Air-Gen* (6. att.) [5]. Pētnieki izmantoja kondensato-

ru ar zelta elektrodiem, tostarp ap desmit mikrometriu biezumu olbaltumvielu nanokatalizatoru (plānāks nekā darbā [4]). Lai nodrošinātu efektīvu mijiedarbību ar atmosfēras mitrumu, augšējā zelta elektroda laukums ir daudz mazāks par apakšējo (6. att.). Pie relatīvā gaisa mitruma 50% ar olbaltumvielu nanokatalizatoru spontāni novēroja spriegumu $V_0 = 0,5$ V un ap 115 nA lielu strāvu. Pētnieki veica speciālus kvantitatīvus adsorbētā ūdens tvaika sadalījuma mērījumus atkarībā no dzīluma (attāluma no augšējā elektroda). Adsorbētā ūdens tvaika (ΔH_2O) apjoms palielinās līdz ar dzīlumu, un tas piesātinās pie katalizatora biezuma ap 10 μm. Paralēlie inducētā sprieguma mērījumi parādīja korelāciju starp adsorbētā ūdens tvaika daudzumu ΔH_2O un inducētā sprieguma vērtību V_0 (6. att. b). Šie mērījumi pierādīja, ka ūdens tvaika kondensācijas procesi ir inducētā sprieguma avots. Pētnieki eksperimentāli noskaidroja, ka optimālais katalizatora biezums ir ap 10 μm – pie šāda biezuma inducētais spriegums piesātinās un ir ap 0,5 līdz 0,6 volti. Tā kā aktīvais slānis kondensatorā ir plāns, iegūtās jaudas blīvums ir 4 milivatts vienā kubikcentrimetrā (4 mW/cm³). Eksperimentāli elektroenerģiju ieguva divu mēnešu ilgā ekspluatācijas periodā (7. att.). Elementārie enerģijas transformācijas procesi katalizatorā ir sarežģīti un līdz galam nav noskaidroti.

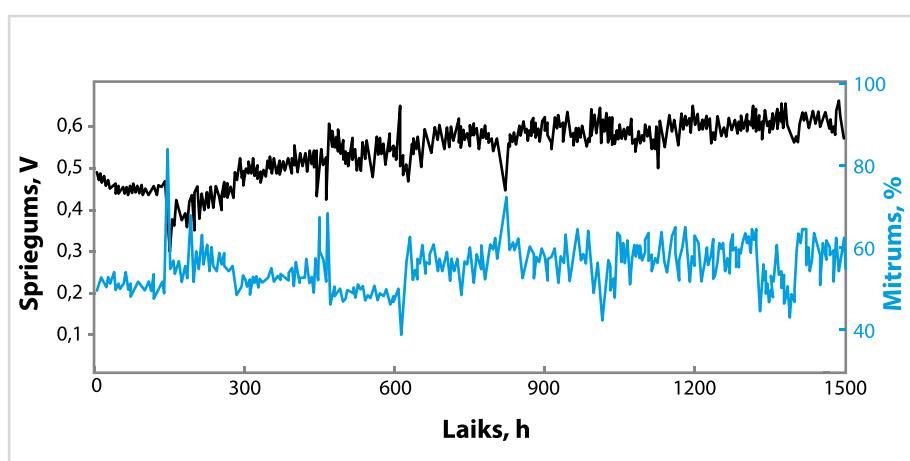
Pētījuma vadītājs profesors Jūns Jao *Air-Gen* ģeneratoru raksturoja šādi: "Mēs burtiski pārvēršam gaisa mitrumu elektrībā." Viņa kolēģis, Mikrobioloģijas katedras vadītājs profesors Dereks Lovlijs (*Derek Lovley*) piebilda: "Tas ir līdz šim pārsteidzošākais un aizraujošākais olbaltumvielu nanokatalizatoru pielietojums."

Izteikumu "Mēs burtiski pārvēršam gaisa mitrumu elektrībā" var aplami tulcot kā *perpetuum mobile*, kaut gan būtībā šis izgudrojums izmanto ūdens tvaiku kondensācijas energiju (ūdens tvaiks → ūdens), kuru ar bakteriāliem nanokatalizatoriem pārvērš elektroenerģijā. Šo pētījumu panākuma noslēpums ir fiziķu, ķīmiķu un mikrobiologu kopīgais radošais darbs, kura apraksts šī gada janvārī tika publicēts prestižajā zinātniskajā žurnālā *Nature* [5]. Te gan jāpiebilst, ka raksta autori atsaucas uz Huhu Čena grupas rezultātiem [4], bet nepiemin profesora Nenada Miljkoviča veikumu [3], kaut gan abas augstskolas atrodas vienā Masačūsetsas štatā.

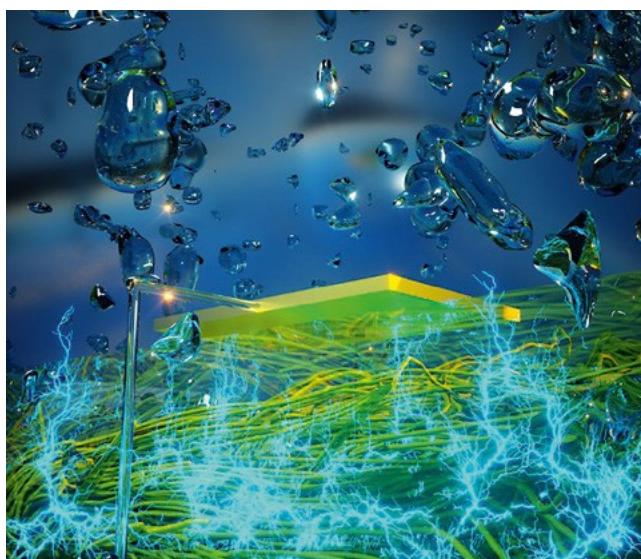
Profesora Jūna Jao grupa pirmā izmantoja bakteriālu olbaltumvielu katalizatoru, kas adsorbēto gaisa mitrumu (ūdens tvaikus) pārvērš elektroenerģijā. Ierīcē *Air-Gen* nepieciešama tikai plāna bakteriāla katalizatora plēve, kuras biezums ir ap 10 mikrometriem (8.,9 att.). Olbaltumvielu nano-



6. attēls. Elektroenerģijas iegūšana no atmosfēras mitruma ar baktēriju sintezēto olbaltumvielu nanokatalizatoru: a - kondensatora shēma ar plānu (ap 10 μm) olbaltumvielu nanokatalizatoru (biezuma mērogs attēlā ir palielināts) starp zelta elektrodiem (oranžā krāsā); b - spontāni inducētais spriegums (zilā līkne) atkarībā no katalizatora slāņa biezuma (d, μm) un eksperimentāli noteiktais adsorbētais ūdens tvaika (ΔH_2O , %) daudzums (melnā līkne) atkarībā no biezuma (slāņa dzīluma). Eksperimenti tika veikti pie 50 % atmosfēras relatīvā mitruma. Zilā bulta attēlā (a) simbolizē eksperimentā novēroto adsorbētā ūdens tvaika gradientu atkarībā no dzīluma [5]



7. attēls. Inducētā sprieguma (melnā līkne) atkarība no laika (stundās) divu mēnešu ilgā ekspluatācijā. Paralēli spriegumam tika mērīts gaisa relatīvais mtrums (zilā līkne) [5]



8.attēls. Mākslinieka skatījumā: olbaltumvielu nanokatalizators (dzeltenie novadī) kondensatorā pārvērš gaisa mitrumu (ūdens pilienus) elektroenerģijā

katalizatoru sintezeža *Geobacter metallireducens* baktērijas (10. att.), kuras projekta līdzautors profesors Lovlijs atklāja Mērilendas štatā Potomakas upes dubļos pirms nekā 30 gadiem. Nosaukums norāda, ka baktērija atrodas zemē (latīņu val. *geo*) un var ķīmiski reducēt metālus (latīņu val. *metallireducens*). Profesors Lovlijs arī atklāja šīs baktērijas spēju sintezēt elektriski vadošus olbaltumvielu novadus [6]. Te jāatceras renesances ģenija Leonardo da Vinči secinājumu: "Ja cilvēka darbība tuvojas vienam un tam pašam mērķim, izmantojot dažādus izgudrojumus un procesus, tas nekad neradīs izgudrojumu, kas būtu labāks par dabu." Pateišām, biokatalizatori ir ļoti efektīvi!

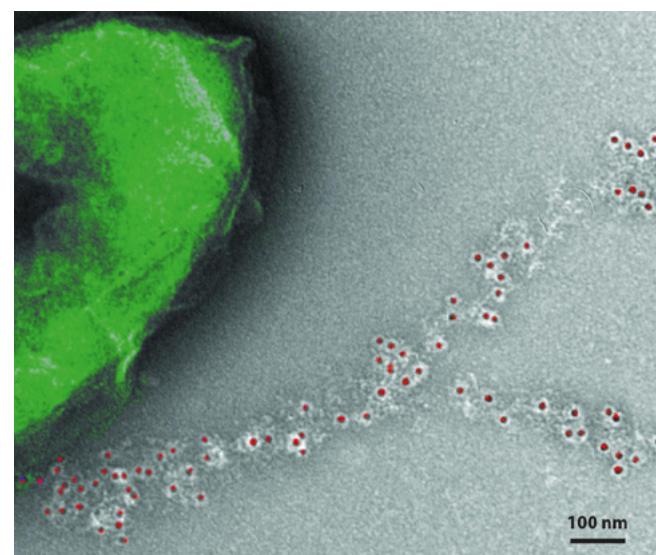
Nākotnes elektroenerģijas avoti

Trīs neatkarīgas zinātnieku grupas ir eksperimentāli pievērdujušas, ka no atmosfēras mitruma var iegūt elektroenerģiju, izmantojot ūdens molekulu kondensāciju [3, 4, 5]. Visos eksperimentos novēroja inducētā sprieguma palielināšanos pie relatīvā gaisa mitruma pieauguma. Pētnieku grupas ļoti optimistiski prognozē šo procesu komerciālu izmantošanu, kaut gan šie procesi ir optimāli siltos un mitros klimatiskos apstākļos. Huhu Čena un Jūna Jao paņēmieni ar kondensatora pildījumu [4, 5] ir tehniski vieglāki izmantojami nekā Milkoviča kondensators atmosfērā ar ūdens pilieniem [3]. Patlaban ir aprakstīti tikai elementārie procesi gaisa mitruma pārvēršanai elektroenerģijā un rūpnieciskā ražošana ir atklāts jautājums, kas prasa inženiertehniskus pētījumus un ekonomisku novērtējumu.

Tehnikas vēsture parāda, ka no Maikla Faradeja elektromagnētiskās indukcijas likumu atklāšanas (1831) līdz Verne-



9.attēls. Air-gen ģeneratora spriegums (544 mV) var darbināt mazas elektroniskās iekārtas (kalkulatoru, viedtālruni u.c.)



10.attēls. Geobakterijas (zaļā krāsa) un sintezēto nanovadu modificēts attēls no transmisijas elektronu mikroskopijas

ra fon Sīmensa pirmajai uzbūvētajai elektrostacijai (1881) pagāja pusgadsimts. Divdesmitajā gadsimtā tehnikas progress kļuva ātrāks un pirmo atomelektrostaciju 1954. gadā Obņinskā (toreizējā Padomju Savienībā) atklāja 1954. gadā jeb sēspadsmit gadus pēc kodoldalīšanās reakciju atklāšanas (Oto Hāns (*Otto Hahn*, 1879 – 1968, Nobela prēmija 1944. gadā). Jāuzsver, ka šo procesu būtiski paātrināja Manhetenas atombumbas projekts. Lai tehniski realizētu mitruma pārvēršanu elektroenerģijā, der atcerēties fon Sīmensa (*Ernst Werner von Siemens*, 1816 – 1892) teikto: "Nekad nesaki nāvējošos vārdus – tas nav iespējams!" E&P

Literatūra

- [1] J. Jeevahan et al., Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges, *J. Coat. Res.* 15 (2), 231 – 250, 2018.
- [2] J. B. Borekyo, C-H. Chen, Self-Propelled Dropwise Condensate on Superhydrophobic Surfaces, *Phys. Rev. Lett.* 103, 184501 (4), 2009.
- [3] N. Milkovic et al., Jumping-droplet electrostatic energy harvesting, *Appl. Phys. Lett.* 105, 013111(5), 2014.
- [4] H. Cheng et al., Spontaneous power source in ambient air of well-directionally reduced carbon graphene oxide bulk, *Energy Environ. Sci.* 11, 2839 – 2845, 2018.
- [5] X. Liu, H. Gao, J. E. Ward, Xiaorong Liu, B. Yin, T. Fu, J. Chen, D. Lovley, J. Yao, Power generation from ambient humidity using protein nanowires, *Nature*, 17 February 2020.
- DOI: 10.1038/s41586-020-2010-9.
- [6] D. Lovley et al., Anaerobic Production of Magnetite by a Dissimilatory Iron-Reducing Microorganism, *Nature* 350, 252 – 254, 1987.