

Pengembangan cengkam elektrostatik fleksibel dengan elektroda berstruktur pilar-pilar skala mikro

Radon Dhelika^{1,2,a,*}, Wahyu Nirbito^{1,b} dan Shigeki Saito^{2,c}

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, Indonesia

²Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Tokyo Institute of Technology,

2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

^aradon.dhelika@gmail.com, ^bwahyu.nirbito@ui.ac.id, ^csaitos@mep.titech.ac.jp

Abstrak

Cengkam elektrostatik (*electrostatic chuck*) merupakan suatu peranti manipulator yang umum dijumpai di industri semikonduktor, terutama untuk mencengkam wafer silikon. Memanfaatkan mekanisme elektrostatik, cengkam elektrostatik menawarkan banyak keunggulan, seperti kemudahan pengaturan gaya penarik dengan mengontrol voltase. Namun, karena gaya penarik berbasis elektrostatik sangat rentan dengan jarak, bila luas permukaan kontak berkurang karena adanya kekasaran pada permukaan benda, maka gaya penarik akan turun secara signifikan. Sebagai solusi, telah muncul ide cengkam elektrostatik dengan elektroda lunak yang didesain menyerupai rambut di kaki cicak agar bisa mencengkam secara fleksibel benda berpermukaan kasar. Makalah ini membahas pengembangan cengkam elektrostatik dengan metode pembuatan mikrofabrikasi. Selembar prototipe telah dibuat dari bahan stainless steel dengan 50 buah elektroda berbentuk pilar persegi panjang berpenampang lintang $100 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$. Pengujian kurva gaya dilakukan dan menunjukkan ketepatan secara kualitatif dengan kurva ideal yang diperoleh dari pemodelan teoretis. Gaya penarik maksimal yang didapat dengan voltase 600 V adalah $343.3 \mu\text{N}$. Untuk menguji kelayakan konsep cengkam elektrostatik fleksibel untuk diterapkan di industri, telah dilakukan pula pengukuran parameter lain seperti penurunan gaya. Selanjutnya, demonstrasi juga ditunjukkan dengan memanipulasi (*pick-and-place*) lembaran aluminium.

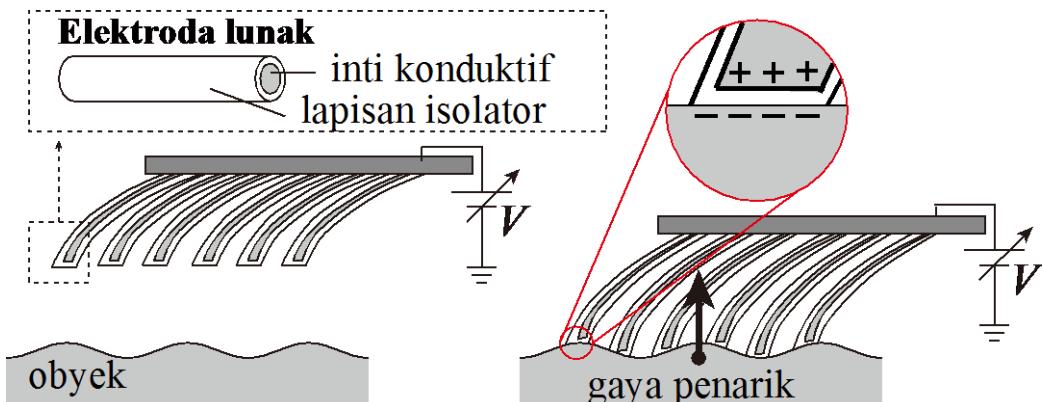
Kata kunci : Elektrostatik, mikrofabrikasi, elektroda lunak

Pendahuluan

Cengkam elektrostatik, atau jamak dikenal sebagai *Electrostatic Chuck* (ESC) [1-3], ialah sebuah peranti manipulator untuk mencengkam obyek, terutama komponen-komponen kecil dengan memanfaatkan mekanisme elektrostatik. Terdiri dari lempengan logam yang berfungsi sebagai elektroda, gaya penarik muncul dari interaksi elektrostatik antara muatan positif dan negatif yang terinduksi dari pemberian voltase pada elektroda. Aplikasi paling umum cengkam elektrostatik bisa dijumpai di industri semikonduktor untuk proses pencengkaman wafer silikon. Meskipun aplikasi cengkam elektrostatik dewasa ini sudah meluas ke berbagai macam bidang seperti robot pendaki tembok [4,5], hanya saja obyek yang bisa

dijadikan target umumnya terbatas pada benda-benda berpermukaan datar. Jika obyek yang dicengkam berpermukaan kasar, maka gaya penarik akan turun drastis dikarenakan sifat gaya elektrostatik yang sangat rentan dengan jarak antara elektroda bermuatan positif dan negatif. Bila cengkam elektrostatik bisa menangani obyek berpermukaan kasar, maka aplikasinya bisa lebih meluas menjangkau industri-industri besar seperti MEMS atau optik dengan berbagai macam komponen-komponen ukuran mikro dengan bentuk-bentuk yang tidak seragam.

Menanggapi masalah ini, telah ada ide pengembangan cengkam elektrostatik lunak dengan elektroda berbentuk pilar-pilar skala



Gambar 1. Konsep cengkam elektrostatik lunak dengan pilar-pilar skala mikro

mikro yang didesain menyerupai rambut di kaki cicak [6,7]. Hal ini juga sejalan dengan trend kebutuhan industri secara umum yang menginginkan peranti manipulator yang lebih fleksibel [8], diiringi trend riset manipulator yang juga menjurus ke arah yang sama dengan kemunculan beberapa ide-ide baru manipulator fleksibel dengan berbagai mekanisme [9-11].

Dengan struktur elektroda berbentuk pilar-pilar, maka kelunakan (*compliance*) bisa disertakan ke sistem cengkam elektrostatik yang memungkinkan penanganan permukaan-permukaan kasar, seperti diilustrasikan di Gambar 1. Dengan permukaan obyek yang dimodel mengikuti fungsi sinus, elektroda lunak akan secara fleksibel menekuk mengikuti kekasaran permukaan sehingga memaksimalkan luas permukaan kontak dan meningkatkan gaya penarik.

Di riset awalan, telah dikembangkan prototipe cengkam elektrostatik lunak dengan menggunakan serat (*fiber*) yang memiliki inti konduktif [6,7]. Hanya saja, berbagai masalah masih dijumpai, terutama berkaitan dengan skalabilitas penambahan jumlah elektroda untuk pengembangan lebih jauh menuju aplikasi riil di industri. Pembuatan serat dengan *melt-spinning apparatus* juga menyebabkan banyak cacat pada serat, yang mengakibatkan prototipe yang terbentuk tidak beraturan dengan lekukan maupun kebengkokan. Agar bisa mengembangkan cengkam elektrostatik yang handal untuk kepentingan aplikasi industri, maka diperlukan metode pengembangan lain yang bisa menghasilkan pilar-pilar elektroda yang lebih beraturan. Karena itu di makalah ini, diajukan

metode pengembangan dengan proses mikrofabrikasi. Basis teori akan diulas secara singkat sebelum pembahasan mengenai proses fabrikasi. Prototipe yang terbentuk kemudian dievaluasi performanya dalam beberapa parameter, sebelum digunakan untuk manipulasi *pick-and-place* lembaran aluminium.

Basis teori

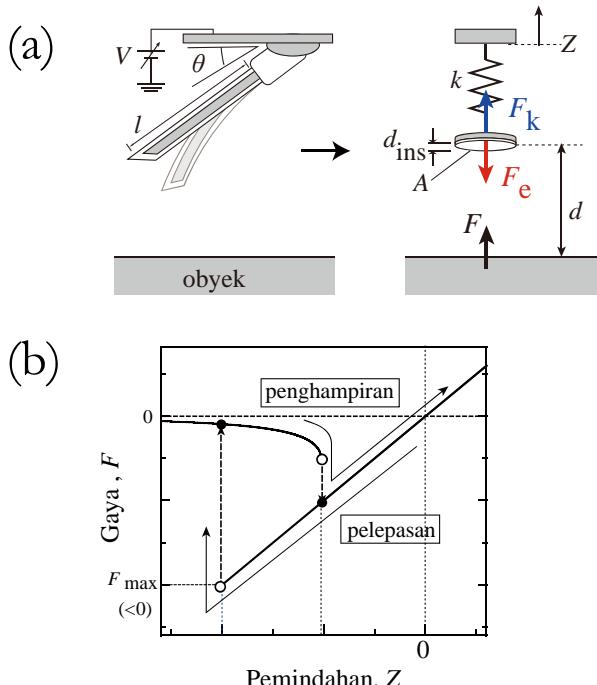
Jika diambil sebuah pilar elektroda cengkam elektrostatik, maka ia dapat dimodel menjadi sebuah sistem sederhana yang mengandung sebuah pegas berkonstanta k dan sebuah kapasitor berluas permukaan A , seperti ditunjukkan pada Gambar 2(a). Obyek merupakan konduktor, sehingga pada ujung elektroda tersebut bekerja dua macam gaya, yaitu gaya elektrostatik F_e yang mengarah ke bawah dan gaya pegas F_k yang berlawanan arah. Kedua gaya tersebut dapat dirumuskan dengan persamaan-persamaan berikut

$$F_e = -\frac{1}{2}AV^2 \left(\frac{\epsilon_{ins}\epsilon_0^2}{(\epsilon_0 d_{ins} + \epsilon_{ins}d)^2} \right) \quad (1)$$

$$F_k = k(d - Z) \quad (2)$$

di mana ϵ_0 adalah permitivitas ruang hampa dan ϵ_{ins} adalah konstanta dielektrik dari lapisan isolator yang digunakan. Persamaan gaya F_e diturunkan dengan model kapasitor lempeng paralel (*parallel-plate capacitor*) dengan penyesuaian jumlah lapisan isolator. Hanya saja, perlu diperhatikan bahwa gaya yang menjadi pusat perhatian pada pengembangan cengkam elektrostatik ialah gaya F yang bekerja pada permukaan obyek. Gaya F ini

bisa secara teoretis dihitung dengan kombinasi F_e dan F_k yang hasilnya seperti ditunjukkan dengan kurva gaya pada Gambar 2(b).



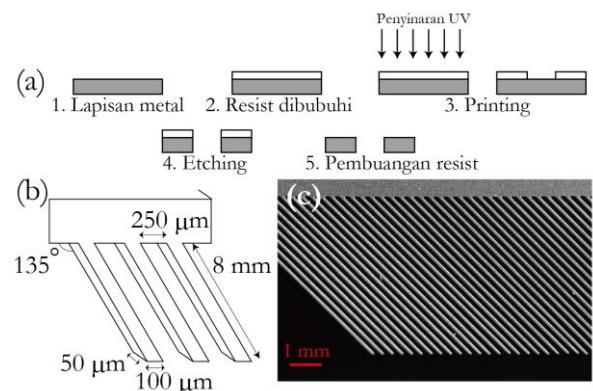
Gambar 2. (a) Pemodelan sebuah pilar elektroda cengkam elektrostatik, (b) kurva gaya teoretis (diadopsi dari [7])

Lewat kurva gaya F - Z tersebut, secara kualitatif dapat dipahami bahwa gaya F berbeda untuk fase penghampiran dan fase pelepasan. Di fase penghampiran, saat cengkam elektrostatik dibawa mendekati permukaan obyek, gaya elektrostatik menjadi dominan dan membuat gaya F bernilai negatif, yang menunjukkan penarikan ke atas. Lalu pada suatu titik, terjadi kontak, menyebabkan F lompat seketika (*jump to contact* [12]), dan setelahnya kurva gaya menjadi linear mengikuti kemiringan dengan nilai konstanta pegas k . Gaya terbesar, F_{\max} , yang merupakan salah satu parameter evaluasi penting untuk aplikasi manipulasi dapat dijumpai pada fase pelepasan.

Fabrikasi dan kurva gaya

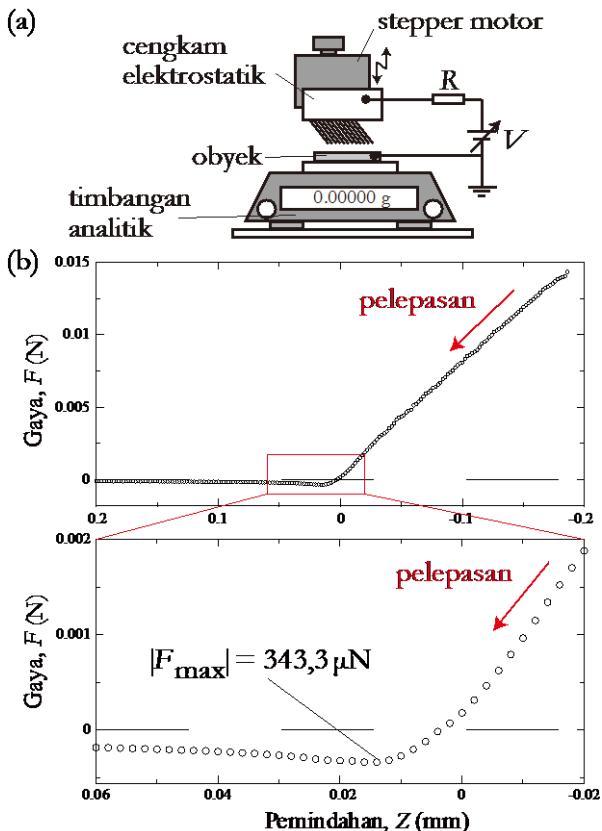
Proses mikrofabrikasi dengan etching kimia basah (*wet chemical etching*) diajukan lewat rangkaian seperti dipaparkan di Gambar 3(a). Prototipe yang ingin dihasilkan berupa sebuah lembaran logam yang mengandung 50 buah pilar elektroda berbentuk balok dengan dimensi $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ seperti dalam skema

di Gambar 3(b). Bahan yang digunakan adalah stainless steel (SUS304) dan proses pembuatan dilakukan oleh Topic Co. Ltd. Dengan dimensi seperti tertera di gambar, diperoleh konstanta pegas k dari masing-masing pilar elektroda sebesar 3,28 N/m. Foto dari prototipe yang telah dibuat ditunjukkan di Gambar 3(c) di bawah.



Gambar 3. (a) Rangkaian proses mikrofabrikasi, (b) skema dan dimensi prototipe yang didesain, (c) foto prototipe dengan 50 buah pilar elektroda

Untuk mengevaluasi performa prototipenya, analisis kurva gaya sangat diperlukan. Pengukuran gaya dilakukan dengan eksperimen menggunakan timbangan analitik dan *stepper motor* untuk menggerakkan prototipe cengkam elektrostatik mendekati obyek (fase penghampiran) dan menjauhi obyek (fase pelepasan), seperti ditunjukkan di Gambar 4(a). Karena gaya terbesar, F_{\max} , adalah parameter terpenting yang menentukan kapabilitas pencengkaman, dan ia dijumpai pada fase pelepasan, maka pada makalah ini, fokus observasi kurva gaya hanya dilakukan untuk fase pelepasan. Kurva gaya hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4(b). Secara kualitatif, kurva gaya yang didapat via eksperimen menunjukkan kesesuaian dengan kurva gaya teoretis di Gambar 2(b). Dengan voltase sebesar 600 V, nilai absolut gaya maksimal yang didapat adalah 343,3 μN . Dibandingkan dengan perhitungan gaya teoretis dengan model kapasitor lempeng paralel, didapati bahwa besaran tersebut berada dalam orde nilai yang sama.

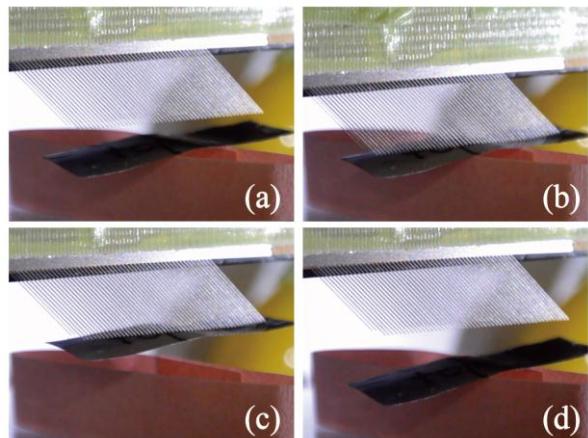


Gambar 4. (a) Pengaturan eksperimen untuk pengukuran gaya, (b) kurva gaya fase pelepasan dan pembesaran pada bagian gaya maksimal F_{\max}

Demonstrasi manipulasi pick-and-place

Selanjutnya, dengan besaran nilai absolut F_{\max} yang didapat, perlu dievaluasi performanya untuk aplikasi manipulasi pick-and-place. Untuk itu, demonstrasi dilakukan untuk mengangkat dan melepas sebuah obyek konduktif. Lembaran aluminium yang dilapisi tape PP dengan berat total 214,2 μN dipilih. Obyek ditentukan lebih ringan dari nilai F_{\max} agar memenuhi kaidah syarat pengangkatan, yaitu $F_{\max} \geq$ berat obyek [7]. Cuplikan layar dari video demonstrasi untuk kasus yang berhasil ditunjukkan pada Gambar 5 di bawah. Voltase sebesar 600 V diberikan kepada prototipe cengkam elektrostatik. Obyek ditempatkan di atas sebuah dudukan kertas berbentuk tabung berongga (warna merah muda dalam Gambar 5) untuk mengurangi luas permukaan kontak obyek dengan permukaan di bawahnya. Hal ini dilakukan untuk mengurangi gaya adesi yang tidak diinginkan. Lewat eksperimen 10 kali, didapat bahwa proses manipulasi pick-and-place dengan obyek tersebut

memiliki tingkat kesuksesan hingga 70% yang menunjukkan keabsahan konsep cengkam elektrostatik yang diajukan.



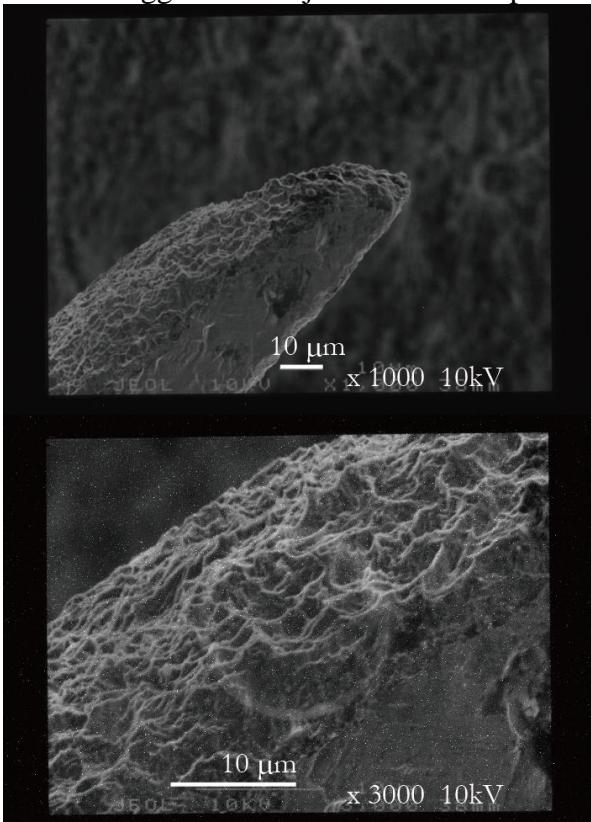
Gambar 5. Demonstrasi manipulasi obyek (pick-and-place), (a) cengkam elektrostatik mendekati obyek, (b) berkontak dengan obyek, (c), mengangkat, dan (d) melepas dengan memutus voltase

Diskusi

Walaupun obyek yang dipilih memiliki berat jauh di bawah F_{\max} , namun didapat bahwa tingkat kesuksesan hanya 70%. Hal ini bisa dijelaskan melalui pengamatan pada rangkaian demonstrasi *pick-and-place* di Gambar 5. Dapat diamati, misalnya melalui Gambar 5(b) bahwa obyek lembaran aluminium memiliki lekukan-lekukan tertentu pada permukaannya, yang menjadikan luas permukaan kontak dengan ujung cengkam elektrostatik menurun. Secara jelas dapat dilihat bahwa beberapa pilar elektroda tidak menyentuh atau hanya menyentuh sebagian dengan permukaan obyek. Hal ini dapat dipahami sebagai salah satu faktor penting yang menyebabkan tingkat kesuksesan manipulasi *pick-and-place* tidak mencapai nilai sempurna 100%. Namun di sisi lain, hal ini juga menunjukkan keunggulan yang ditawarkan lewat kelunakan (*compliance*) struktur pilar elektroda. Dengan struktur yang ditunjukkan oleh prototipe tersebut, membuat obyek seperti lembaran aluminium, yang umumnya susah dimanipulasi dengan cengkam elektrostatik konvensional, dapat dimanipulasi dengan baik.

Selain evaluasi dengan eksperimen, F_{\max} juga bisa didapat dengan perhitungan numeris. Software metode elemen hingga COMSOL

digunakan untuk melakukan perhitungan tersebut. Menggunakan modul AC/DC dan dengan penentuan kondisi batas (*boundary condition*) sesuai dengan kondisi pada eksperimen, didapat nilai F_{\max} sebesar $503\mu\text{N}$. Jika dibandingkan dengan nilai ini, maka F_{\max} hasil eksperimen mengalami penurunan gaya sebesar kira-kira 32%. Penurunan gaya ini bisa jadi disebabkan banyak faktor, dan salah satunya adalah ketidakteraturan permukaan pilar elektroda seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Hal ini menyebabkan luas permukaan kontak, yang merupakan elemen penting dari F_e , menjadi berkurang. Di masa depan, agar bisa lebih meningkatkan F_{\max} mendekati nilai ideal yang ditunjukkan perhitungan numeris, maka proses pembuatan harus ditingkatkan kualitasnya. Misalnya proses etching atau pemotongan dengan laser resolusi tinggi bisa menjadi salah satu opsi.



Gambar 6. Foto SEM yang menunjukkan ketidakteraturan permukaan pilar elektroda

Untuk aplikasi industri, diperlukan skalabilitas yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik. Misalnya saja untuk meningkatkan gaya terbesar, F_{\max} , jumlah lapisan atau pilar elektroda bisa ditambah selain juga menaikkan besaran nilai voltase. Hanya saja nilai voltase akan terbatas pada

kekuatan dielektrik (*dielectric strength*) dari lapisan isolator yang digunakan maupun ruang hampa.

Kesimpulan

Cengkam elektrostatik lunak dengan 50 buah pilar elektroda telah berhasil dikembangkan hingga fase prototipe. Basis teori dan pemodelan satu buah pilar elektroda telah diberikan dan dilanjutkan dengan proses fabrikasi prototipe. Lalu evaluasi prototipe dilakukan dengan membahas kurva gaya dan demonstrasi manipulasi *pick-and place*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa konsep cengkam elektrostatik lunak yang diajukan layak untuk diaplikasikan di industri, setelah melalui pengembangan lebih lanjut untuk mengoptimalkan gaya yang dihasilkan.

Referensi

- [1] Wardly, George A. "Electrostatic wafer chuck for electron beam microfabrication." *Review of Scientific Instruments* 44.10 (1973): 1506-1509.
- [2] Yatsuzuka, Kyoko, et al. "Fundamental characteristics of electrostatic wafer chuck with insulating sealant." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 36.2 (2000): 510-516.
- [3] Asano, Kazutoshi, et al. "Fundamental study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 38.3 (2002): 840-845.
- [4] Prahlad, Harsha, et al. "Electroadhesive robots—wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology." *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on.* IEEE, 2008.
- [5] Yamamoto, Akio, et al. "Wall climbing mechanisms using electrostatic attraction generated by flexible electrodes." *Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2007. MHS'07. International Symposium on.* IEEE, 2007.
- [6] Saito, Shigeki, et al. "Compliant electrostatic chuck based on hairy

microstructure." *Smart Materials and Structures* 22.1 (2013): 015019.

[7] Dhelika, Radon, et al. "Electrostatic chuck consisting of polymeric electrostatic inductive fibers for handling of objects with rough surfaces." *Smart Materials and Structures* 22.9 (2013): 095010.

[8] Fantoni, Gualtiero, et al. "Grasping devices and methods in automated production processes." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 63.2 (2014): 679-701.

[9] Brown, Eric, et al. "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material." *Proceedings of the National*

Academy of Sciences 107.44 (2010): 18809-18814.

[10] Trivedi, Deepak, et al. "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research." *Applied Bionics and Biomechanics* 5.3 (2008): 99-117.

[11] Shan, Wanliang, Tong Lu, and Carmel Majidi. "Soft-matter composites with electrically tunable elastic rigidity." *Smart Materials and Structures* 22.8 (2013): 085005.

[12] Landman, Uzi, et al. "Nanomechanics and dynamics of tip–substrate interactions." *Journal of Vacuum Science & Technology B* 9.2 (1991): 414-423.