

# SISTEM KONTROL PADA ATOMIC FORCE MICROSCOPY DAN NANO POSITIONING

(CONTROL SYSTEM FOR ATOMIC FORCE MICROSCOPY AND NANO POSITIONING)

Estiko Rijanto

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika (Puslit TELIMEK) LIPI  
Jl. Cisitau No.21/154D, Tel.022-2503055, Bandung 40135  
estiko.rijanto@lipi.go.id; estiko@hotmail.com

## ABSTRAK

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi instrumentasi *Scanning Probe Microscopy* (SPM) telah memungkinkannya berfungsi sebagai mata dan jari untuk melihat dan mengontrol materi pada ukuran nano meter. Hal ini memberi dampak yang dramatis pada teknologi nano (*Nanotechnology*) di berbagai bidang meliputi: biologi, biokimia, farmasi, elektro-kimia, tribologi, material, dan fisika. Peranan teknik kontrol sangat penting pada instrumentasi teknologi nano karena tanpa kontroler yang memadai instrumen ini tidak dapat berfungsi dengan baik. Tujuan makalah ini adalah untuk menjelaskan perancangan konsep sistem kontrol pada instrumentasi teknologi nano khususnya *Atomic Force Microscopy* (AFM) dan *Nano Positioning*. Kontroler untuk *Thermal Driven Noncontact AFM* pada prinsipnya meregulasi frekuensi resonansi dengan mengontrol jarak memakai kontroler umpan balik, sedangkan untuk *Transient Force AFM* pada prinsipnya menggunakan Kalman filter untuk meningkatkan kecepatan dan menjaga mutu citra. Hasil eksperimen sistem nano positioning untuk AFM menunjukkan bahwa penggunaan metoda kontrol kokoh  $H_{\infty}$  memberikan hasil *scanning* yang lebih baik dibandingkan dengan kontrol klasik. Hasil eksperimen untuk *ultra-high density electronic data storage* menunjukkan kontroler menggunakan umpan balik dan umpan maju mampu merealisasikan *data storage* dengan kapasitas 1 Tera bit per inci persegi dengan kecepatan baca/tulis 12,5 kilo bit per detik.

**Kata kunci:** teknologi nano, sistem kontrol, *Atomic Force Microscopy*, nano positioning.

## ABSTRACT

*Science and technology advancement in Scanning Probe Microscopy has enabled it to function as eyes and fingers for monitoring and control of material in nanometer scale. This gives dramatic impact on nanotechnology in various fields including: biology, biochemistry, medicine, electrochemistry, tribology, materials science, and surface physics. This paper aims in describing conceptual design of control system for nanotechnology instrumentations specifically Atomic Force Microscopy (AFM) and Nano Positioning. This paper has been written as a review of the state-of-the-art of related references. The principle of AFM, dynamical model of micro cantilever – sample, perspective of system and control are described first. The controller used in Thermal Driven Noncontact AFM functions to regulate resonance frequency by controlling separation using feedback control, while the controller used in Transient Force AFM functions to enhance bandwidth while maintaining scanning quality using Kalman filter. Experimental results show that  $H_{\infty}$  control provides better performance than classical control when applied to nano positioning for AFM. By using feedback and feed forward controllers an ultra-high density electronic data storage with capacity of 1 Tb per square inch and velocity of 12.5 kb/s has been obtained.*

**Keyword:** nanotechnology, control system, *Atomic Force Microscopy*, nano positioning.

## I. PENDAHULUAN

Pada tahun 2000 Inisiatif Teknologi Nano Amerika Serikat menyatakan "*STMs, AFMs, and near-field microscopes provide the eyes and fingers required for nano structure, manipulation, and measurement*" [1]. Penemuan STM (*Scanning Tunneling Microscope*) dan AFM (*Atomic Force Microscope*) melahirkan satu kelas instrumen baru yang

disebut SPM (*Scanning Probe Microscope*). Instrumen ini mampu berfungsi sebagai *eyes* untuk "melihat" dan sebagai *fingers* untuk "mengontrol" berbagai materi pada ukuran atom dalam berbagai lingkungan yang berbeda-beda sehingga memberikan dampak yang dramatis kepada berbagai bidang ilmu penge-tahuan dan teknologi yaitu: biologi, biokimia, farmasi, elektro-kimia, tribologi, material (metal, non metal), dan fisika

permukaan. Kemampuan untuk mengontrol dan melihat topografi material pada ukuran atom telah menghasilkan teknologi *ultra-high density data storage* [2]. Kemampuan mengontrol dan melihat material biologi pada ukuran atom dapat mengantar kepada percobaan bio-molekuler yang mengarah pada penemuan obat (*drug discovery*) [3].

Ada tiga isu terpenting dalam upaya pengembangan nano material di Indonesia [4]:

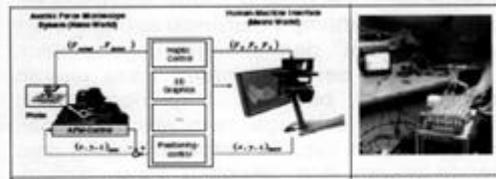
1. Bagaimana membuat partikel yang berukuran nano,
2. Bagaimana mengkarakterisasi sifat-sifat dan fenomena nano partikel yang telah dibuat,
3. Bagaimana menyusun kembali nano partikel dan mensintesisnya menjadi produk akhir yang diinginkan.

Kemampuan untuk "melihat" dan "mengontrol" atom pada dunia ukuran nano meter yang dimiliki SPM memberi jawaban kepada isu ke-dua dan ke-tiga tersebut.

Para penemu STM (*Scanning Tunneling Microscope*) dan AFM (*Atomic Force Microscope*) menyadari sepenuhnya peranan kontrol umpan balik dan mereka telah menggunakan kontroler PI (*proportional integral*) yang memungkinkan alat mereka dapat berfungsi. Pada awalnya kegiatan penelitian dan pengembangan SPM terfokus pada proses fisik mendasar yang mempengaruhi fungsi instrumen canggih tersebut.

Saat ini tuntutan dari pengguna teknologi SPM adalah: pencitraan yang lebih cepat, resolusi yang lebih tinggi, pengoperasian yang kokoh (*robust*), dan citra yang lebih mirip dengan aslinya. Meskipun pada awalnya digunakan strategi kontrol konvensional, namun untuk menjawab tuntutan teknologi SPM masa depan diperlukan teknik kontrol yang lebih moderen.

Gambar 1 menunjukkan ilustrasi prototipe sistem fabrikasi nano dan sistem robot nano untuk mengontrol posisi material skala atom [5][6]. Sistem ini tersusun oleh elemen utama berupa: (1) AFM sebagai instrumen skala nano meter, (2) *Video display* sebagai



**Gambar 1.** Sistem Fabrikasi Nano dan Robot Nano

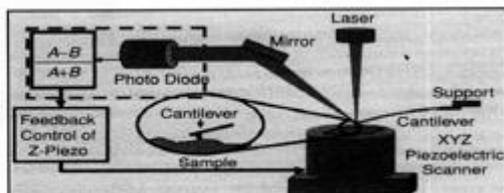
antar muka operator melihat citra, dan (3) *joy stick* atau *key board* umpan balik gaya sebagai antar muka operator mengatur posisi ujung lengan kantilever mikro.

Fokus pembahasan pada makalah ini adalah sistem kontrol pada instrumentasi skala nano meter khususnya AFM dan *nano positioning*. Pertama diulas prinsip kerja AFM. Kedua dikaji pemodelan sistem AFM yaitu kantilever mikro dan interaksinya dengan sampel yang dilihat dan dikontrol. Ketiga dibahas sistem kontrol untuk AFM, dan keempat dibahas sistem kontrol untuk *nano positioning*. Terakhir disampaikan kesimpulan dan saran.

## II. PRINSIP DASAR

Karena peranannya yang sangat vital dalam dunia nano teknologi yaitu sebagai mata untuk "melihat" dan sebagai jari untuk "mengontrol" atom, pada bagian ini diulas tentang prinsip dasar AFM. AFM pada dasarnya mengandalkan kemampuan mengukur gaya antar atom yang sangat kecil. Sebuah kantilever mikro yang berujung tajam digunakan sebagai alat untuk mengukur gaya tersebut. Untuk dapat mencatat nilai gaya antar atom yang lemah, kantilever ini harus dikondisikan agar tidak terpengaruh oleh gangguan dari lingkungan. Sumber gangguan berasal dari getaran yang memiliki PSD (*Power Spectral Density*) yang kuat pada frekuensi 0 s.d. 2 kHz. Oleh karena itu, kantilever harus digetarkan dengan frekuensi resonan lebih tinggi dari 2 kHz.

Gambar 2 menunjukkan ilustrasi konfigurasi yang umum digunakan pada AFM. Gaya antara atom pada ujung kantilever dengan atom pada sampel membuat kantilever melengkung dan titik ujung kantilever pindah posisi (defleksi). Perpindahan posisi titik ujung kantilever diukur menggunakan sinar laser yang difokuskan ke ujung kantilever yang kemudian dipantulkan dari permukaan ujung kantilever ke photodioda.



**Gambar 2.** Ilustrasi AFM (*Atomic Force Microscope*)

Perubahan posisi ujung kantilever merubah sudut pertemuan antara sinar laser dengan permukaan ujung kantilever yang berarti merubah posisi pertemuan sinar laser dengan photodioda yang dapat dicatat sebagai perubahan tegangan pada photodioda. Panjang sinar laser yang dipantulkan memberikan efek penggandaan terhadap perubahan posisi ujung kantilever.

Pangkal kantilever ditempatkan padaudukan yang dipasang ke *dither piezo* yang menggetarkan kantilever dengan frekuensi lebih dari 2 kHz. Sebuah *scanner* yang digerakkan oleh material *piezo-electric* mengatur posisi sampel ke arah horisontal dan vertikal.

Kantilever mikro dibuat dari bahan silikon nitride dan silikon oxide dengan teknik fabrikasi mikro. Panjang, lebar dan tebalnya masing-masing 100, 10 dan 2 mikro meter. Koefisien kekakuannya berkisar 0,06 s.d. 100 N/m [7].

### III. KAJIAN PEMODELAN

#### 3.1 Model Kantilever

Kantilever mikro merupakan bahan lentur. Model dinamika modal pertamanya diberikan oleh model *spring-mass-damper* seperti persamaan berikut ini.

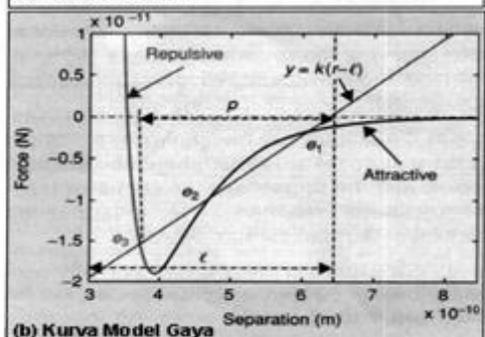
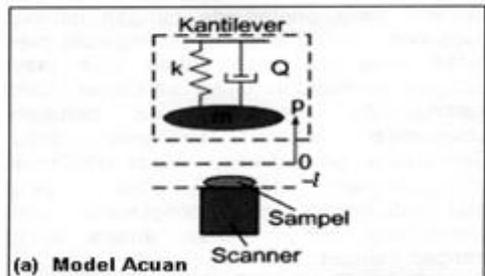
$$\ddot{p} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{p} + \omega_0^2 p = f(t) \quad (1)$$

$$y = p + v \quad (2)$$

$p$ ,  $f$ ,  $y$ , dan  $v$  masing-masing menunjukkan defleksi ujung kantilever, gaya, defleksi yang tercatat pada photodioda, dan derau pengukuran. Sedangkan  $\omega_0$  dan  $Q$  masing-masing adalah frekuensi modal pertama (frekuensi resonan) dan faktor kualitas kantilever. Faktor kualitas menentukan jumlah energi kantilever yang hilang terserap lingkungan. Umumnya frekuensi modal pertama berkisar 10 – 400 kHz, sedangkan faktor kualitas bernilai 2 di dalam cairan hingga 10.000 di dalam ruang hampa. Derau pengukuran didominasi oleh frekuensi rendah dan *white-noise* pada frekuensi di atas beberapa kilohertz. Parameter model ini dapat diidentifikasi secara tepat [8]. Model ini sangat penting untuk penerapan perspektif sistem dan kontrol pada AFM.

#### 3.2 Model Interaksi Kantilever-Sampel

Gaya interaksi antara atom ujung kantilever dengan atom sampel dapat



Gambar 3. Pemodelan Kantilever -Sampel

dimodelkan menggunakan gaya Lennard-Jones sebagai berikut:

$$F(r) = -\frac{6A}{r^7} + \frac{12B}{r^{13}} \quad (3)$$

$r$  adalah jarak antara ujung kantilever dan sampel. Gambar 3 (a) menunjukkan model *spring-mass-damper* sebagai model acuan dan Gambar 3 (b) menunjukkan kurva model gaya.

Suku  $\frac{A}{r^7}$  memodelkan interaksi Van der Waals yang menunjukkan gaya tarik menarik antar atom. Efek gaya tarik jarak jauh ini muncul ketika 2 atom terpisah pada jarak kurang dari 10 nm. Jika jarak antar atom kurang dari 1 Amstrong, tumpukan awan elektron dan interaksi ion menimbulkan gaya saling tolak. Efek gaya saling tolak ini dimodelkan oleh suku  $\frac{B}{r^{13}}$ .

Model ini memberikan karakterisasi kualitatif, namun berbagai faktor menyebabkan deviasi antara model dengan hasil eksperimen. Analisis lebih detil tentang interaksi permukaan atom dapat dilihat di referensi [9].

#### 3.3 Model Kurva Gaya

Sensitivitas photodioda menentukan hubungan antara tegangan listrik yang

tercatat pada photodiode dengan defleksi kantilever. Sensitivitas ini dipengaruhi oleh sudut pada titik temu antara sinar laser dengan permukaan ujung kantilever. Oleh karena itu sensitivitas ini berubah-ubah setiap diganti kantilever baru. Sensitivitas photodiode dapat dikalibrasi menggunakan kurva gaya yang menghubungkan hasil pengukuran oleh photodiode dengan jarak antara ujung dengan sampel.

Pada Gambar 3 (b), posisi keseimbangan adalah posisi kantilever ke posisi referensi nol saat tanpa adanya sampel. Arah defleksi  $p$  positif jika menjauhi sampel. Jarak antara sampel ke posisi referensi nol  $l$  dapat diatur dengan menggerakkan sampel vertikal mendekati atau menjauhi kedudukan kantilever menggunakan aktuator *piezo-electric* pada *scanner*. Jarak antara ujung kantilever dengan sampel adalah:

$$r = l + p \quad (4)$$

Persamaan gerak defleksi kantilever diberikan oleh

$$\ddot{p} = F(p, l) - kp \quad (5)$$

Titik keseimbangan diperoleh saat kondisi berikut terpenuhi:

$$\dot{p}_{eq} = 0 \quad (6)$$

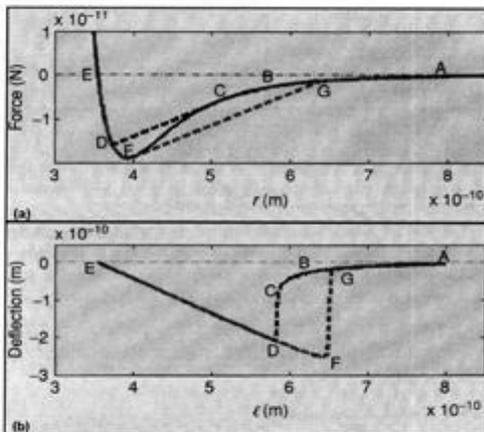
$$F(p_{eq}, l) = kp_{eq} \quad (7)$$

Pada gambar 3 (b) titik keseimbangan adalah titik potong antara kurva  $k(r, l)$  dengan  $F(r, l)$ . Untuk nilai tertentu  $l$ , titik keseimbangan  $p_{eq} = r_{eq} - l$  tidak stabil jika pada titik tersebut gradien gaya Lennard-Jones  $F(r, l)$  lebih besar dari pada gradien garis lurus gaya pegas

$$\left. \frac{\partial F(p, l)}{\partial p} \right|_{p=r_{eq}} = \left. \frac{\partial F(r, l)}{\partial r} \right|_{r=r_{eq}} > k \quad (8)$$

Pada gambar 3 (b) titik keseimbangan  $e_1$  dan  $e_3$  adalah stabil, sedangkan titik keseimbangan  $e_2$  tidak stabil.

Pada saat sampel digerakkan perlahan dari jauh mendekati ujung kantilever, titik keseimbangan bergerak sepanjang kurva Lennard-Jones dari zona tarik-menarik ke zona saling tolak sampai titik tertentu. Kemudian saat sampel digerakkan perlahan menjauhi ujung kantilever, titik keseimbangan bergerak sepanjang kurva Lennard-Jones dari zona saling tolak ke zona tarik-menarik. Gambar 4 menunjukkan proses pergerakan titik keseimbangan saat sampel digerakkan mendekati dan menjauhi ujung



Gambar 4. Kurva gaya

kantilever. Trayektori gaya dan trayektori defleksi saat sampel digerakkan mendekati ujung kantilever adalah A-B-C-D-E, sedangkan saat menjauhi kantilever adalah E-D-F-G-A. Terdapat histerisis pada kedua kurva tersebut.

Kurva gaya adalah kurva yang menghubungkan defleksi kantilever dengan jarak offset sampel ke titik acuan nol  $l$ . Kurva gaya menjadi landasan metoda bagi AFM untuk mengurai fenomena gaya antar molekul pada molekul bio.

### 3.4 Thermal Noise

Pada kondisi keseimbangan thermal, kantilever mendapat gaya *thermal noise* yaitu *white noise* yang membuat kantilever terdefleksi secara acak. Fungsi alih dari thermal noise eta ke defleksi kantilever  $p$  diberikan oleh

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (9)$$

Pada titik frekuensi resonan pengaruh thermal noise lebih dominan, sedangkan pada frekuensi lainnya pengaruh derau pengukuran lebih dominan terhadap defleksi. Oleh karena itu, kinerja probe kantilever dibatasi secara thermal pada frekuensi resonannya.

Frekuensi response terhadap thermal noise memberikan jalan praktis untuk melakukan kalibrasi kantilever. Dengan menggunakan PSD di titik resonan, nilai parameter kantilever (kekakuan  $k$ , faktor kualitas  $Q$ , frekuensi resonan  $\omega_0$ ) dapat diidentifikasi [9].

Kantilever mendapat pengaruh gaya thermal noise  $\eta$ , gaya interaksi antara atom  $h$ , dan gaya *dither*  $g(t)$ . Fungsi alih kantilever pada (9) memetakan inputan gaya

$$f = g + h + \eta \quad (10)$$

ke defleksi

$$p = Gf \quad (11)$$

yang diukur dalam bentuk sinyal pengukuran

$$y = p + v = G(g + h + \eta) + v \quad (12)$$

Dimana  $v$  adalah derau pengukuran yang timbul dari laser dan photodiode.

### 3.5 Perspektif Sistem dan Kontrol

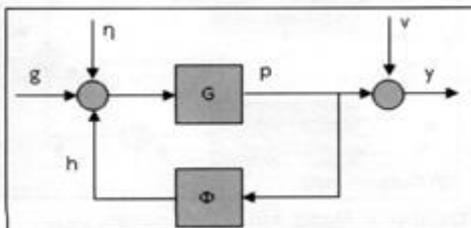
Tantangan teknologi SPM berupa: resolusi yang lebih tinggi dan waktu yang lebih cepat dapat dijawab menggunakan persepektif sistem dan teori kontrol, karena SPM merupakan sistem dinamik. Dari (1) dan (10) sistem dinamika kantilever dapat diekspresikan sebagai sebuah gabungan sistem dinamik linier (yaitu fungsi alih  $G(s)$ ) dan sistem statik non-linier (yaitu gaya antar atom dari sampel per satuan massa). Gambar 5 menunjukkan diagram kotak sistem dinamik kantilever dari persepektif sistem dan kontrol.

## IV. PEMBAHASAN SISTEM KONTROL UNTUK ATOMIC FORCE MICROSCOPY

Bagian ini mengulas dua tipe AFM dari persepektif sistem kontrol yaitu [10]: *Thermally Driven Noncontact AFM* (ThNcAFM) dan *Transient Force AFM* (TF-AFM).

### 4.1 Thermal Driven Noncontact AFM

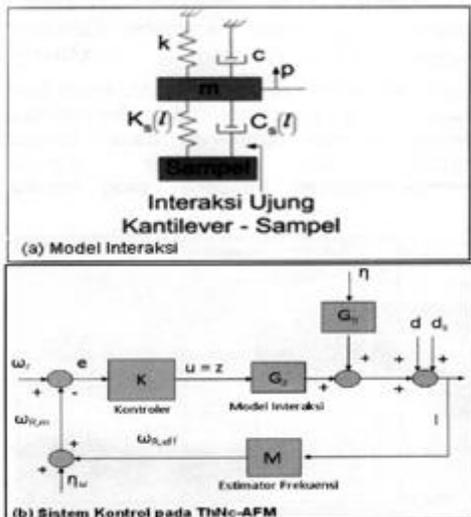
Pada beberapa penelitian nano teknologi diperlukan investigasi gaya antar atom antara ujung kantilever dan sampel tanpa sentuhan pada suhu kamar. Salah satunya adalah untuk mendeteksi gerakan permukaan sel dengan cara non kontak [11]. Pada ThNc-AFM ujung kantilever dikontrol agar selalu berada pada zona tarik menarik.



Gambar 5. Diagram Kotak Dinamik AFM

Kantilever memiliki konstanta pegas efektif  $k_{eff}$  dan frekuensi resonan efektif  $\omega_{eff}$  yang berubah-ubah yaitu mengecil pada zona tarik menarik dan membesar pada zona saling tolak. Respon defleksi ujung kantilever terhadap thermal noise dimonitor untuk menjaga agar tetap pada zona tarik menarik. Kantilever tidak mendapat pengaruh gaya lain kecuali gaya thermal noise. Pergeseran (*drift*) nilai frekuensi resonan dapat disebabkan oleh berbagai faktor misalnya: perubahan suhu, relaksasi, dan efek piezo-kristal. Frekuensi ekuivalen yang diestimasikan dari data respon defleksi terhadap thermal noise dibandingkan dengan nilai frekuensi referensi, dan posisi sampel dikontrol untuk meregulasi frekuensi ekuivalen tersebut. Dengan cara ini, jarak antara ujung dan sampel dapat dipertahankan terhadap berbagai gangguan. Teknik kontrol umpan balik digunakan untuk tujuan ini.

Gambar 6 menunjukkan model dan sistem kontrol yang digunakan pada rancangan bangun kontroler untuk ThNc-AFM. Pengaruh sampel dimodelkan sebagai mekanisme pegas  $K_s$  dan damper  $C_s$ . Kekakuan sistem total lebih rendah daripada kekakuan kantilever bebas  $k$ , dan frekuensi resonan sistem total berbeda dengan frekuensi kantilever bebas. Saat kantilever berada pada zona tarik menarik  $K_s$  bernilai negatif, sedangkan saat kantilever berada pada zona

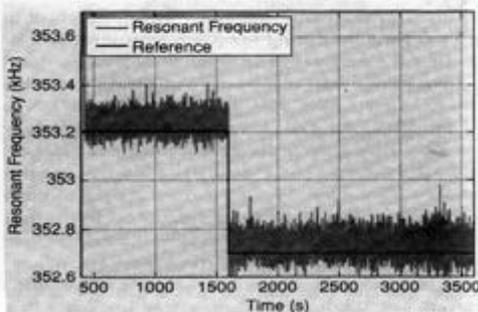


Gambar 6 . Model dan Sistem Kontrol pada ThNc-AFM

saling tolak  $K_s$  bernilai positif. Sehingga, saat pada zona tarik menarik berlaku  $\omega_{eff} < \omega_0$ , sebaliknya saat pada zona saling tolak berlaku  $\omega_{eff} > \omega_0$ .

Fungsi alih  $G_c(s)$  melambangkan fungsi alih dari posisi sampel  $z$  ke jarak antara ujung kantilever dengan sampel  $p$ , fungsi alih  $G_e(s)$  melambangkan fungsi alih dari thermal noise  $\eta$  ke  $p$ .  $M(s)$  adalah fungsi alih dari  $p$  ke  $\omega_{R,eff} > \omega_0$ . Frekuensi resonan efektif kantilever yang dibuat oleh  $M(s)$  dihitung menggunakan metoda dekomposisi harmonik Pisarenko [12].  $K(s)$  adalah kontroler umpan balik yang menggerakkan sampel ke arah sumbu  $z$  menggunakan kontrol output  $u$ , agar frekuensi resonan yang terukur  $\omega_{R,m}$  sama dengan frekuensi referensi  $\omega_R \cdot n_{\omega}$  adalah derau pada estimasi frekuensi. Proses pergeseran (*drift*) dilambangkan sebagai gangguan  $d$  pada posisi sampel, sedangkan perubahan bentuk (fitur) sampel dilambangkan sebagai  $d_s$ . Gangguan  $d$  berjalan lambat sehingga mengandung informasi pada frekuensi rendah. Kontroler dirancang agar fungsi transfer lup tertutup memfilter pengaruh gangguan  $d$ , sedangkan pengaruh perubahan bentuk sampel  $d_s$  dapat dide-teksi dari perubahan  $\omega_{R,eff}$ .

Gambar 7 menunjukkan hasil eksperimen menggunakan parameter kantilever bebas  $k = 1 \text{ N/m}$ ,  $Q = 450$ ,  $\omega_0 = 2\pi \cdot 350 \times 10^3 \text{ rad/s}$ , dan pada suhu 300 Kelvin. Pada saat awal, ujung kantilever tidak berinteraksi dengan sampel (kantilever dalam kondisi bebas), dan kontroler mampu mempertahankan frekuensi yang terukur



Gambar 7. Kinerja Kontroler pada ThNc -AFM

pada nilai 353,6 kHz mendekati nilai frekuensi referensi 353,2kHz. Saat waktu 1500 detik, nilai referensi dirubah dan kontroler mampu mengikuti perubahan ini. Setelah itu, frekuensi efektif  $\omega_{R,eff}$  lebih kecil dari frekuensi bebas  $\omega_0$  selama 30 menit berarti bahwa ujung kantilever berada pada zona tarik menarik dengan sampel.

Kemampuan kontroler mengontrol posisi kantilever dan sampel pada ukuran nano meter dalam waktu yang lama memungkinkan aplikasi teknologi nano untuk memonitor dinamika molekul bio.

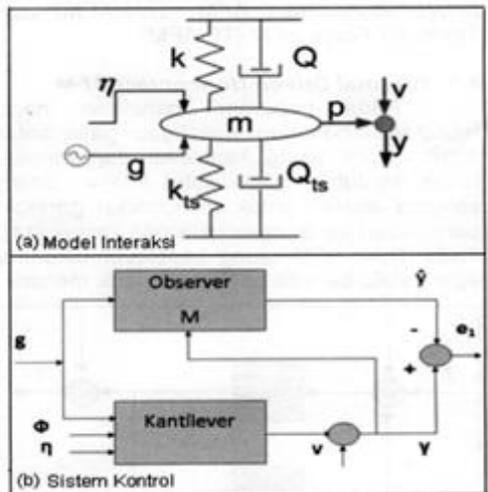
#### 4.2. Transient Force AFM

TF-AFM menggunakan model dinamika secara waktu nyata untuk meningkatkan kecepatan pencitraan sampel saat scanning. Gambar 8 menunjukkan model dan sistem kontrol yang digunakan pada TF-AFM.

Saat kantilever digetarkan oleh *dither piezo* dengan frekuensi resonan bebas  $\omega_0$ ,  $g(t) = \gamma \sin \omega_d t$ , pengaruh gaya thermal noise dapat diabaikan, sehingga persamaan gerak kantilever orde dua saat digetarkan oleh *dither piezo* adalah:

$$p(t) = A_0 \sin(\omega_d t + v_0) + A' e^{-\zeta \omega_d t} \sin(\omega' t + v) \quad (13)$$

Dimana  $\omega' = \omega_0 \sqrt{1 - 1/4Q^2}$ ,  $v$  dan  $A'$  ditentukan nilainya oleh nilai awal  $p(0)$  dan



Gambar 8. Model dan Sistem Kontrol pada TF-AFM.

$\dot{p}(0)$ . Komponen sinyal transien akan hilang karena ada faktor  $e^{-(\omega_n/2Q)t}$ . Lamanya waktu sampai komponen sinyal transien hilang setara dengan  $Q$  siklus waktu. Untuk mendapatkan resolusi tinggi diperlukan nilai  $Q = 100$  sampai 50.000, sehingga membatasi kecepatan scanning.

Akan tetapi, setelah fitur pertama dari sampel selesai berinteraksi dengan kantilever, pengaruh gaya antar atom hilang ( $h=0$ ), sehingga gerakan kantilever murni ditentukan oleh (12). Oleh karena itu sebuah observer  $M$  dapat dirancang bangun menggunakan nilai parameter kantilever ( $k, m, Q$ ) dan dapat digunakan untuk menghitung nilai variabel ruang keadaan kantilever meskipun sinyal pengukuran  $y$  masih mengandung komponen sinyal transien.

Kemampuan observer menghitung secara waktu nyata nilai posisi kantilever dan kecepatannya ditentukan oleh mutu observer yang dirancang bangun dan tidak tergantung nilai faktor kapasitas  $Q$ . Sebagai contoh, jumlah periode osilasi  $N$  yang diperlukan oleh observer untuk menghitung variabel ruang keadaan secara tepat adalah 4 [13].

Observer tersebut dapat dirancang bangun menggunakan Kalman filter untuk meminimalkan sinyal inovasi  $e_1 = y - \hat{y}$ . Dengan cara demikian, pada TF-AFM kecepatan waktu scanning dapat ditingkatkan tanpa mengorbankan resolusi.

## V. PEMBAHASAN SISTEM KONTROL UNTUK NANO POSITIONING

Pada dasarnya AFM menggunakan nano positioning yaitu untuk mengontrol posisi sampel ke arah vertikal (sumbu  $z$ ) dan ke arah horizontal (sumbu  $x$  dan  $y$ ). *Ultra-high sensitivity data storage* juga menggunakan nano positioning untuk mengontrol posisi arah sumbu  $x$  dan sumbu  $y$ . Pada bagian ini diulas dua tipe nano positioning yaitu: (1) nano positioning yang digunakan pada AFM, dan (2) nano positioning untuk data storage.

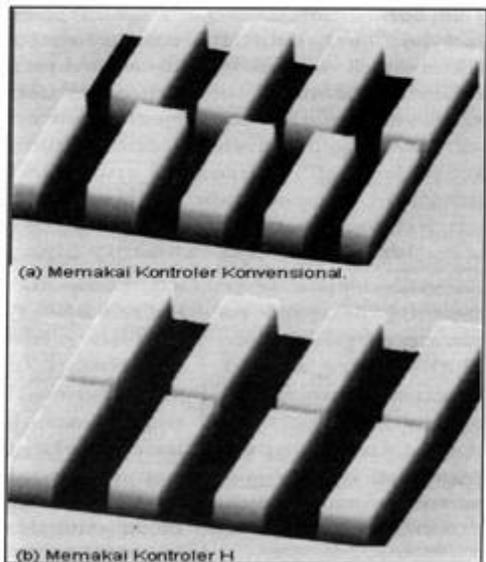
### 5.1 Nano Positioning pada AFM

Umumnya sistem nano positioning untuk AFM tersusun oleh [10]: (1) meja fleksibel yang bergerak secara deformasi elastis, (2) aktuator *piezo-electric* yang memberikan gaya ke meja fleksibel, (3)

sensor yang mengukur gerakan meja fleksibel, dan (4) kontroler posisi.

Perlu dipilih material yang cocok untuk meja fleksibel yang memiliki karakteristik: mampu bergerak dalam jangkauan yang panjang (10 – 150  $\mu\text{m}$ ), dan tidak ada bagian gesekan sehingga tidak memiliki *backlash* dan gaya gesek. Aktuator *piezo-electric* memiliki beberapa keunggulan yaitu: resolusi sub-nanometer, menghasilkan gaya beberapa puluh kN, waktu tanggap yang cepat dengan percepatan setara  $10^4$  g, tidak terpengaruh medan magnet, dan dapat digunakan pada rentang suhu rendah sampai tinggi. Namun *piezo-electric* memiliki kekurangan yaitu sifatnya yang non-linier karena pengaruh histerisis. Gerakan translasi dapat diukur memakai berbagai jenis sensor seperti: *linear variable differential transducers* (LVDT), *strain gauges*, atau sensor optik. Sensor dipilih yang memiliki resolusi beberapa Amstrong dengan lebar pita 1kHz.

Kontroler dirancang agar sistem nano positioning memiliki kinerja yang bagus yaitu: tingkat akurasi yang tinggi, kecepatan mengikuti perubahan nilai referensi (*tracking*), dan ketahanan terhadap gangguan dan derau. Salah satu cara untuk merealisasikan adalah dengan aplikasi teknik kontrol kokoh (*robust*)  $H_\infty$ . Gambar 9 menunjukkan hasil eksperimen yang menunjukkan keunggulan teknik kontrol kokoh  $H_\infty$  dibandingkan dengan teknik



Gambar 9. Hasil Scan Maju Mundur

kontrol konvensional [10]. Sebuah sampel discan maju dan mundur kemudian hasil citranya dimunculkan di monitor komputer.

Gambar 9 (a) adalah hasil saat memakai kontroler konvensional dan gambar 9 (b) saat memakai kontroler kokoh  $H_{\infty}$ . Pada Gambar 9 (a) terdapat perbedaan antara hasil scan saat gerakan mundur dengan hasil scan saat gerakan maju, dan juga terdapat pergeseran posisi fitur. Sedangkan pada gambar 9 (b) hasil scan gerakan mundur sama dengan hasil scan gerakan maju dan tidak nampak pergeseran posisi fitur. Hasil ini menunjukkan teori kontrol yang lebih moderen memberikan kontrol lebih memuaskan jika dibandingkan teori kontrol klasik yang lebih sederhana. Teori dan aplikasi kontrol kokoh  $H_{\infty}$  dapat dilihat pada referensi [14].

## 5.2 Nano Positioning pada Data Storage

Data storage yang diulas pada makalah ini tersusun oleh [15]: (1) *storage field* berukuran  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  terbuat dari lapisan tipis polimer, (2) chip kantilever tersusun oleh kantilever mikro terbuat dari silikon yang dilengkapi dengan pemanas (*heater*) mikro untuk membaca dan menulis data biner, (3) MEMS *micro scanner* yang tersusun oleh 1 buah scan table dan 2 buah aktuator (berupa magnet permanen dan lilitan mini) dimana komponen mekanik terbuat dari wafer silikon setebal  $400\mu\text{m}$ , (4) Dua tipe sensor posisi yaitu sensor posisi thermal yang berfungsi sebagai sensor posisi global dan sensor posisi absolut yang memiliki presisi nano meter terbuat dari pasangan beberapa *storage field* dengan kantilevernya yang telah dituliskan informasi posisi terlebih dahulu.

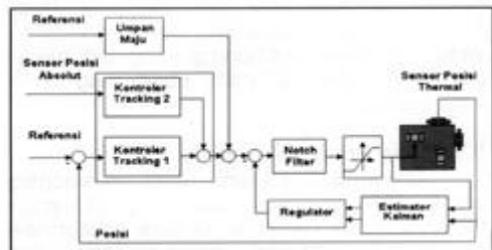
Model dinamika MEMS *micro scanner* digunakan untuk rancang bangun kontroler nano positioning. Identifikasi model dilakukan dengan cara mengukur respon frekuensi melalui eksperimen. Posisi arah sumbu x dan sumbu y diukur menggunakan sensor posisi thermal yang mana dinamikanya ditentukan oleh dinamika pemanas mikro. Dinamika pemanas mikro dimodelkan sebagai fungsi alih orde satu dengan lebar pita 4 kHz. Fungsi alih dari inputan berupa arus listrik yang dialirkan ke lilitan mini ke keluaran berupa posisi untuk sumbu x dan sumbu y masing-masing dimodelkan menggunakan model orde dua *spring-mass-damper*. Hasil eksperimen menunjukkan frekuensi resonansi untuk arah

sumbu x adalah 176,4Hz dan arah sumbu y adalah 156,5Hz. Di atas frekuensi 1 kHz muncul resonansi ke-2 dan ke-3 untuk masing-masing sumbu. Kontroler dirancang-bangun menggunakan model orde dua dengan mengabaikan resonansi pada frekuensi tinggi.

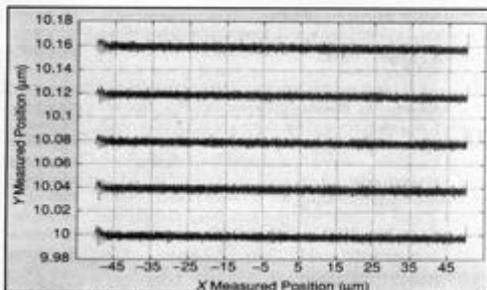
Fungsi kontroler nano positioning pada *data storage* ada dua yaitu: (1) prosedur *seek-and-settle*, dan (2) prosedur *track-follow*. Prosedur *seek-and-settle* memin-dahkan posisi meja scan dari koordinat awal ke koordinat lajur target. Prosedur *track-follow* menjaga agar posisi ujung kantilever untuk baca/tulis tetap di tengah-tengah lajur target selama proses scanning sepanjang lajur target yang diinginkan. Selama proses *track-follow*, setiap lajur discan pada arah horizontal dengan kecepatan tetap dengan menjaga agar posisi baca/tulis tidak bergeser ke arah lajur tetangganya akibat adanya gangguan dan derau.

Sistem kontrol posisi *track-follow* ditunjukkan pada Gambar 10. Indikator kinerja sistem nano positioning ini adalah: (1) kemampuan *tracking* (mengikuti perubahan nilai referensi), (2) kemampuan eliminasi pengaruh gangguan, dan (3) sensitivitas terhadap derau. Sistem kontrol posisi *track-follow* harus mampu meminimalkan simpangan (*error*) pada frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Sensor posisi thermal digunakan karena memiliki karakteristik derau yang baik pada frekuensi tinggi dan mampu mengukur jangkauan posisi yang panjang. Namun sensor posisi thermal rentan terhadap pengaruh derau frekuensi rendah dan *drift*. Untuk mengkompensasi kekurangan tersebut digunakan juga sensor posisi absolut yang memiliki keunggulan pada frekuensi rendah.

Sinyal arus listrik yang mengalir ke aktuator lilitan mini dan sinyal keluaran sensor posisi thermal dimasukkan ke Kalman estimator (filter) untuk mengestimasi



Gambar 10. Sistem Kontrol Sumbu y.



**Gambar 11** . Hasil Scan Pada Lajur dengan Jarak Antar Lajur 40 nm.

variabel ruang keadaan (posisi dan kecepatan). Keluaran Kalman filter dimasukkan ke regulator yang dirancang menggunakan metoda *linear quadratic*. *Notch filter* digunakan untuk menekan pengaruh resonansi frekuensi tinggi. Dua kontroler umpan balik *tracking* digunakan masing-masing menerima informasi pengukuran posisi dari sensor posisi thermal dan sensor posisi absolut. Untuk lebih memperbaiki kinerja *tracking* ditambahkan kontroler umpan maju.

Gambar 11 menunjukkan hasil eksperimen sistem nano positioning pada *ultra-high density data storage*. Scanning dilakukan sepanjang  $100\mu\text{m}$  pada sumbu x dengan perubahan lajur pada sumbu y dengan jarak antar lajur  $40\mu\text{m}$ . Dari hasil eksperimen ini diperoleh standar deviasi simpangan (*error*) posisi arah sumbu y sebesar  $0.73\text{ nm}$ . Kecepatan scanning adalah  $0.25\text{ nm}/\mu\text{s}$  yang setara dengan  $12,5\text{ kb/s}$ . Sistem nano positioning ini mampu membaca/menulis data sebanyak 1 Tera bit per inci persegi.

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Kesimpulan tulisan ini adalah sebagai berikut:

1. *Atomic Force Microscopy* (AFM) bersama-sama dengan sistem *Nano Positioning* berfungsi sebagai mata dan jari untuk melihat dunia pada skala nano meter dan untuk mengatur atom-atom pada skala nano meter.
2. Teori kontrol konvensional diaplikasikan pada AFM dan *Nano Positioning* agar instrumen tersebut dapat berfungsi untuk

mengambil citra pada ukuran nano meter.

3. Teori kontrol moderen diaplikasikan pada AFM dan *Nano Positioning* untuk mendapatkan citra hasil scanning yang lebih tinggi mutunya (resolusi) dan lebih cepat waktu pengambilannya.
4. Aplikasi teknik kontrol pada AFM memungkinkan manusia meneliti gaya antar molekul bio dalam jangka waktu yang lama dan mengatur struktur molekul yang mengarah pada *drug discovery*.
5. Aplikasi teknik kontrol pada *Nano Positioning* untuk menyimpan data elektronik (*data storage*) memungkinkan diperolehnya *data storage* dengan kapasitas 1 Tera bit per inci persegi dengan kecepatan waktu baca/tulis  $12,5$  kilo bit per detik.

### 6.2 Saran

Rancang bangun AFM dan Nano Positioning memerlukan Sumber Daya Manusia (SDM) dari berbagai disiplin ilmu pengetahuan dan teknologi. Penulis melihat SDM dengan berbagai kompetensi yang diperlukan telah tersedia di Indonesia. Sementara itu AFM telah tersedia di pasar internasional dengan harga yang mahal. Belajar dari pengalaman selaman ini banyak alat canggih yang tidak dapat digunakan secara optimal, diperlukan adanya kelompok SDM yang menekuni teknologi AFM agar dapat mendukung pemeliharaan jika AFM dibeli dari pasar internasional. Mengingat perannya yang vital, perlu adanya kajian untung rugi untuk membandingkan antara melakukan rancang bangun AFM sendiri atau membeli terus menerus dari pasar internasional.

## VII. DAFTAR PUSTAKA

1. National Science and Technology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanosclae Science, Engineering, and Technology, "National nanotechnology initiative: The initiative and its implementation plan", July 2000; <http://www.nano.gov/nni2.pdf>
2. P.Vettiger, G.Cross, M.Despont, U.Drechsler, U.Durig, B.Gotsmann, W.Haberele, M.A.Lantz, H.Rothuizen, R.Stutz, and G.Binnig, "The millipede-nanotechnology entering data storage",

- IEEE Trans. Nanotech., vol.1, no.1, pp. 38-55, 2002.
3. J.Xu, M.Lynch, J.L.Huff, C.Mosher, S.Vengasandra, G.Ding and E.Henderson, "Microfabricated quill-type surface patterning tools for the creation of biological micro/nano arrays", IEEE Trans. Nanotech., vol.6, no.2 pp.1367-2176, 2004.
  4. Nurul Taufiq Rochman dan Jumarnan, "Peluang dan Strategi Pengembangan Nanoteknologi di Indonesia", Jurnal Riset Industri, Vol.2, No.1, pp.58-63, Juni 2008.
  5. Melin Sitti, "NSF Workshop on Future Directions in Nano-Scale Systems, Dynamics and Control". Carnegie Mellon University, prepared for IEEE Control Magazine, 2004.
  6. Antoine Ferrera and Constantinos Mavroidis, "Virtual Reality and Haptics for Nano Robotics: A Review Study", IEEE Robotics and Automation Magazine, Revised Version April 2005.
  7. D. Sarid, Scanning Force Microscopy with Application to Electric, Magnetic and Atomic Forces, London, United Kingdom, Oxford Univ. Press, 1991.
  8. M.V.Salapaka, H.S.Bergh, J.Lai, A.Majumdar, and E.McFarland, "Multi-mode noise analysis of cantilevers for scanning probe microscopy", J.Appl. Phys., vol.81,no.6,pp.2480-2487, Mar. 1997.
  9. J.N.Israelachvili, Intermolecular and Surface Forces, NY, Academic, 1985.
  10. M.Salapaka & V.Salapaka, "Scanning Probe Microscopy", IEEE Control Systems Magazine, Vol.28, No.2, pp.65-83, April 2008
  11. A.E.Peling, S.Sehati, E.B.Gralla, J.S.Valentine &K.Gimzewski, "Local nano mechanical motion of the cell wall of *Saccharomyces cerevisiae*", Science, vol.305, no.5687, pp.1147-1150, 2004
  12. V.F.Pisarenko, "The retrieval of harmonics from a covariance function", Geophys.J.R.Astron. Soc., vol.33 pp.347-366, 1973.
  13. D.Sahoo,Sebastian,&V.Salapaka,"Harmessing transient signals in atomic force microscopy", Int. J. Robust Nonlinear Control, vol 15, 2005
  14. Estiko Rjanto, Robust Control : Theory for Application, ISBN:979-9299-12-8, ITB Press, Bandung, 2000.
  15. A.Sebastian, A.Pantazi, H. Pozidis and E. Elefthericu, "Nanopositioning for Probe-Based Data Storage", IEEE Control Systems Magazine, Vol.28, No.4, pp.25-35, August 2008.