

## Komparasi Metode Deteksi Friksi Statis Katup Berbasis Pencocokan Grafis

Daniel Kristanto\*), Awang N.I. Wardana & Widya Rosita

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

*daniel.kristanto@mail.ugm.ac.id\**

### Abstrak

Akhir-akhir ini, performansi yang buruk pada sistem kontrol menjadi isu yang penting dalam industri. Performansi yang buruk pada sistem kontrol akan memberikan dampak negatif pada proses produksi sebuah industri, seperti menurunnya kuantitas ataupun kualitas hasil industri. Masalah utama dari sistem kontrol adalah ketidaklinieran yang disebabkan oleh adanya friksi statis pada katup. Penelitian mengenai friksi statis sudah banyak dilakukan. Metode-metode yang pernah diperkenalkan menggunakan beberapa teknik yang berbeda-beda, seperti pencocokan grafis, pengolahan sinyal, dan perhitungan statistik. Dalam makalah ini dibandingkan dua metode yang menggunakan teknik pencocokan grafis, yaitu pencocokan kurva yang dirumuskan oleh He dan pencocokan elips yang dirumuskan oleh Choudhury. Perbandingan dilakukan dengan 2 jenis input, yaitu data simulasi dan implementasi pada data industri. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa metode pencocokan elips lebih baik dalam mendeteksi friksi statis dibandingkan dengan pencocokan kurva menggunakan data simulasi, tetapi kedua metode memberikan hasil yang hampir sama pada implementasi data industri. Kelebihan lain dari metode pencocokan elips adalah dapat mengkuantifikasi besarnya friksi statis yang terjadi.

Kata Kunci: *Sistem kontrol, friksi statis, pencocokan grafis, pencocokan kurva, pencocokan elips.*

### 1 Pendahuluan

Sistem kontrol merupakan bagian yang harus diperhatikan di bidang industri. Performansi yang buruk pada sistem kontrol akan memberikan dampak negatif pada proses produksi sebuah industri, seperti menurunnya kuantitas ataupun kualitas hasil industri [1]. Beberapa masalah yang dapat terjadi pada sebuah sistem kontrol adalah *tuning* yang tidak tepat, gangguan eksternal, dan ketidaklinieran [2]. Ketidaklinieran menjadi masalah yang utama dan harus diperhatikan dalam sistem kontrol. Munculnya ketidaklinieran bisa disebabkan oleh proses yang tidak linier dan adanya friksi statis, saturasi, ataupun histeresis pada katup. Hingga saat ini, friksi statis pada katup menjadi penyebab utama ketidaklinieran pada suatu sistem kontrol [2].

Metode untuk mendeteksi adanya friksi statis pada katup sudah banyak dirumuskan. Metode-metode ini menggunakan teknik yang berbeda-beda seperti pencocokan grafis, pengolahan sinyal, dan perhitungan statistik. Horch menggunakan teknik pengolahan sinyal berupa korelasi silang dari data variabel proses (PV) untuk mendeteksi friksi statis pada proses *self regulating* [3]. Untuk proses *integrating*, Horch merumuskan metode berbasis perhitungan statistik dengan menghitung distribusi *Gaussian* dan *camel* untuk mendeteksi friksi statis [3]. Teknik lain yang digunakan untuk mendeteksi friksi statis adalah pencocokan grafis. He merumuskan bagaimana mendeteksi friksi statis dengan mencocokkan kurva pada data dan kurva estimasi yang dibuat berdasarkan pemodelan friksi statis [4]. Metode yang hampir sama dirumuskan oleh Scali dan Rossi dengan menambahkan kurva baru yaitu *relay*, untuk dicocokkan dengan kurva data [3]. Lee dkk. membuat sebuah kurva estimasi menggunakan pemodelan Hamerstein untuk memodelkan ketidaklinieran pada friksi statis yang kemudian dicocokkan dengan data

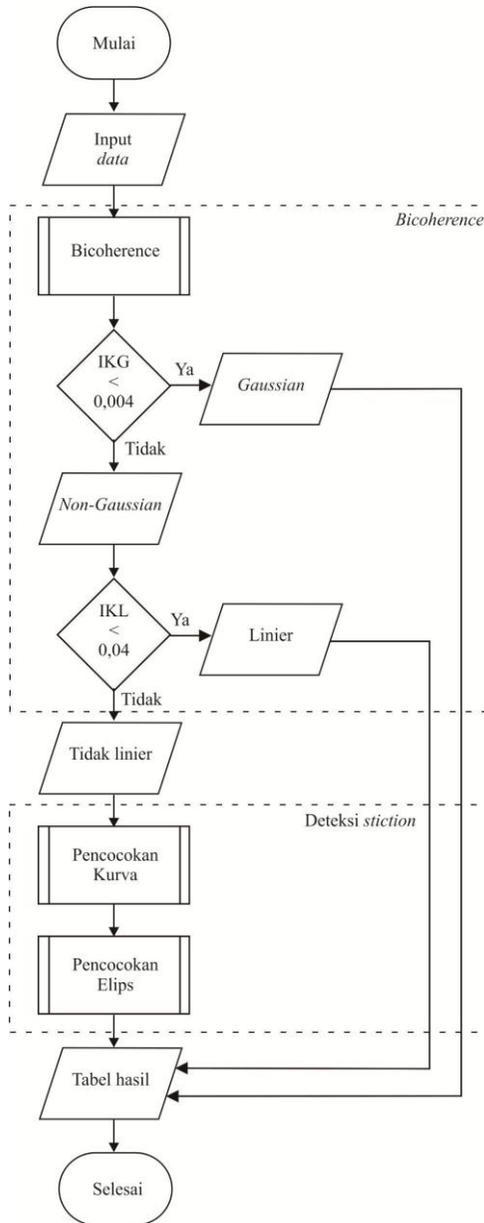


berdasarkan skema friksi statis dikembangkan. Pemodelan friksi statis yang dipakai pada penelitian yang diacu oleh penelitian ini adalah pemodelan friksi statis menurut He dan Coudhury.

Pemodelan friksi statis He [4] merumuskan bentuk kurva keluaran pengendali (OP) dari katup yang mengalami friksi statis akan membentuk kurva kotak. Dengan adanya integrator yang ada pada sebuah loop kontrol, maka kurva ini akan menjadi berbentuk segitiga sebagai hasil dari integral kotak. Namun jika katup tidak mengalami friksi statis, kurva akan berbentuk sinusoidal [4]. Berbeda dengan pemodelan He, pemodelan friksi statis Choudhury [9] menggunakan data OP dan PV. Menurut pemodelan Choudhury, kurva OP-PV sebuah katup yang mengalami friksi statis akan membentuk kurva elips.

## 2.1 Program Deteksi Friksi statis

Untuk mendeteksi keberadaan friksi statis, awalnya data harus terdeteksi tidak linier. Dalam penelitian yang diacu oleh makalah ini, deteksi ketidaklinieran menggunakan *bicoherence* yang juga dirumuskan oleh Choudhury [6]. Gambar 2 menunjukkan bagaimana diagram alir dari deteksi friksi statis yang terdiri dari dua bagian yaitu *bicoherence* dan deteksi friksi statis.



**Gambar 2. Diagram alir deteksi friksi statis [5]**

Bicoherence: Sebelum mendeteksi keberadaan stiction, terlebih dahulu data harus terdeteksi tidak Gaussian dan tidak linier. Parameter IKG (Indeks Ketidak-Gaussian) dan IKL (Indeks Ketidaklinieran) digunakan untuk menentukannya. Jika IKG dan IKL lebih dari batas yang ditentukan, maka data terdeteksi tidak Gaussian dan tidak linier [8]. Dalam penelitian yang diacu oleh makalah ini, digunakan batas 0.004 untuk IKG dan 0.04 untuk IKL sesuai dengan jumlah data yang dipakai, 1024 [8]. Untuk mendapatkan nilai IKG dan IKL,

digunakan bicoherence yang merupakan normalisasi dari bispectrum. Bispectrum sendiri merupakan representasi frekuensi dari parameter statistik cumulant orde ketiga. Cumulant orde ketiga ini merepresentasikan kecondongan kurva yang akan merepresentasikan nilai IKG dan IKL. Nilai IKG dan IKL dapat dihitung dengan persamaan (1) dan persamaan (3) [8].

$$IKG \triangleq \frac{\sum bic_{sig}^2}{L} - \frac{c_{\alpha}^2}{2KL} \quad (1)$$

Dengan  $bic_{sig}^2$  adalah *bicoherence* estimasi yang memenuhi persamaan (2).

$$bic^2(f_1, f_2) > \frac{c_{\alpha}^2}{2K} \quad (2)$$

$$IKL \triangleq bic_{max}^2(\overline{bic_{robust}^2} + 2\sigma_{bic^2,robust}) \quad (3)$$

Dengan  $bic_{max}^2$  adalah nilai maksimal *bicoherence* estimasi,  $\overline{bic_{robust}^2}$  adalah rerata *bicoherence* estimasi, dan  $\sigma_{bic^2,robust}$  adalah standar deviasi *bicoherence* estimasi.

Deteksi Friksi statis: Dalam deteksi friksi statis ini, digunakan 2 metode, yaitu pencocokan kurva dan pencocokan elips. Deteksi friksi statis yang pertama adalah menggunakan metode pencocokan kurva yang dirumuskan oleh He [4]. Pada metode ini, dibuat 2 kurva estimasi untuk dicocokkan dengan data, yaitu kurva sinusoidal dan kurva segitiga. Kedua kurva ini dibuat setiap setengah periode dari data. Kurva sinusoidal, a, dibuat sesuai persamaan (4) dan (5).

$$a \equiv \sin(\omega(t_{i+1} - t_i) + \theta) \quad (4)$$

$$\omega = \frac{\pi}{t_i - t_{i+1}}, \quad (5)$$

Dengan  $t_i$  adalah titik temu nol dengan urutan  $i$ , dan  $t_{i+1}$  adalah titik temu nol pada urutan  $i+1$ . Titik  $t_i$  dan  $i+1$  merupakan batas setengah periode data.

Berbeda dengan kurva sinusoidal estimasi, kurva segitiga estimasi tidak dibuat menggunakan persamaan, melainkan interpolasi linier tiga titik, yaitu awal setengah periode data, titik puncak, dan akhir setengah periode data.

Setelah didapatkan kurva estimasi sinuoidal dan segitiga, kedua kurva ini dicocokkan dengan data dan dihitung nilai MSE (*Mean Squared Error*). Nilai friksi statis *index* (SI) dapat dihitung berdasarkan nilai MSE menurut persamaan (6).

$$SI = \frac{MSE_{sinus}}{MSE_{sinus} + MSE_{tri}} \quad (6)$$

Nilai SI di atas 0.6 menandakan data lebih cocok dengan kurva segitiga dan berarti terjadi friksi statis, jika kurang dari 0.4 menandakan tidak ada friksi statis karena data lebih cocok dengan kurva sinusoidal. Nilai SI di antara 0.4 – 0.6 memberikan kesimpulan tidak diketahui atau metode ini tidak dapat memberikan hasil yang tepat.

Metode deteksi friksi statis yang kedua adalah pencocokan elips. Pencocokan elips berawal dari persamaan 7 yang merupakan persamaan dasar kerucut [8].

$$a_1x_1^2 + a_{12}x_1x_2 + a_2x_2^2 + b_1x_1 + b_2x_2 + c = 0 \quad (7)$$

Pada kasus sebenarnya, persamaan kerucut saja belum bisa secara tepat memberikan pencocokan elips. Rotasi pada elips diperlukan untuk menghasilkan hasil yang lebih tepat. Dengan  $Q$  adalah matriks rotasi, persamaan (7) menjadi persamaan (8) [8].

$$Q^T A Q \bar{x} + (2t^T A + b^T) Q \bar{x} + t^T A t + b^T t + c = 0 \quad (8)$$

Dengan persamaan 8 ini, didapatkan sebuah elips estimasi untuk melakukan pencocokan dengan kurva OP-PV. Jika kurva OP-PV membentuk elips, maka ada friksi statis yang muncul. Friksi statis ini dapat diukur besarnya dengan persamaan (9) [8].

$$AP = \frac{2mn}{\sqrt{m^2 \sin^2 \theta + n^2 \cos^2 \theta}} \quad (9)$$

$m$  dan  $n$  merupakan lebar dari elips.

## 2.2 Hasil dan pembahasan

Untuk membandingkan ketepatan hasil deteksi kedua metode deteksi friksi statis, kedua metode ini akan digunakan untuk menganalisa data simulasi yang sudah diketahui hasilnya dan juga data nyata berupa data industri. Data simulasi ini terdiri dari dua bagian yaitu data tidak friksi statis dan data friksi statis.

Data tidak friksi statis yang digunakan adalah data sinusoidal dan saturasi. Data sinusoidal diketahui tidak friksi statis karena data ini adalah data linier. Sedangkan data saturasi diketahui tidak friksi statis karena saturasi adalah penyebab ketidaklinieran katup selain friksi statis. Hasil dari simulasi tidak friksi statis dari kedua metode ada pada Tabel 1.

**Tabel 1 Hasil deteksi *stiction* dengan data tidak friksi statis**

Input	Pencocokan Kurva		Pencocokan Elips	
	SI	FS	SI	FS
Sinusoidal	0,267	Tidak	0	Tidak
Saturasi	0,894	Ya	0	Tidak

Data selanjutnya yang digunakan adalah data friksi statis. Data friksi statis yang akan dipakai adalah data *cut* PV dan data simulasi friksi statis yang dirumuskan oleh Choudhury. Data *cut* PV dibuat dengan membuat kurva sinusoidal untuk OP dan PV dengan perbedaan fasa. Data simulasi friksi statis oleh Choudhury [9], memberikan data berupa empat jenis friksi statis, yaitu *pure deadband*, *undershoot*, *no offset*, dan *overshoot*. Tabel 2 menunjukkan hasil dari kedua metode dengan input kelima data di atas.

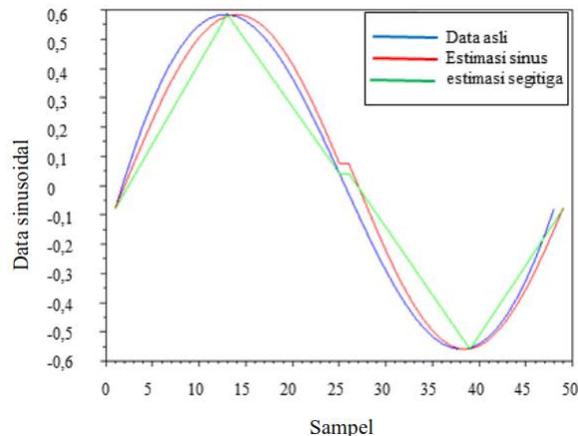
**Tabel 2 Hasil deteksi *stiction* dengan data friksi statis**

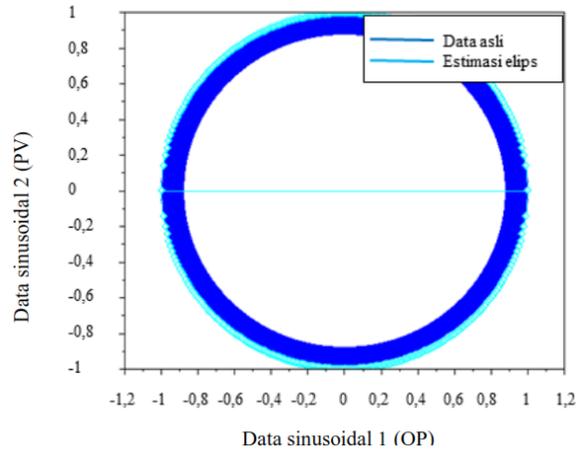
Input	Pencocokan Kurva		Pencocokan Elips	
	SI	FS	SI	FS
<i>Cut PV</i>	0,123	Tidak	2,419	Ya
<i>Pure deadband</i>	0,520	TD	14,469	Ya
<i>Undershoot</i>	0,550	TD	12,120	Ya
<i>No offset</i>	0,650	Ya	9,531	Ya
<i>Overshoot</i>	0,740	Ya	10,672	Ya

TD = tidak diketahui, FS = fraksi Statis

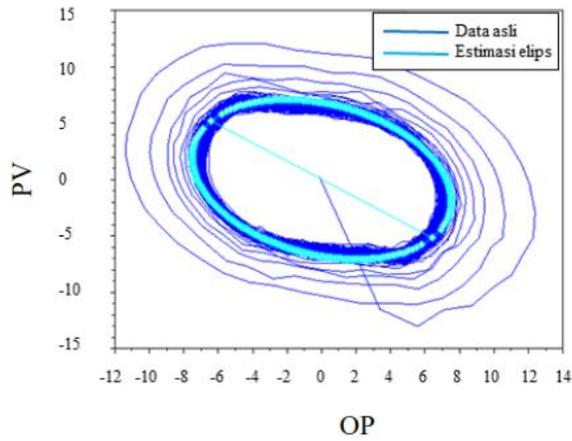
Dari kedua tabel tersebut, secara keseluruhan metode pencocokan elips memberikan hasil yang tepat untuk semua input, sedangkan metode pencocokan kurva hanya memberikan tiga hasil yang tepat, dua hasil tidak tepat, dan dua tidak diketahui, Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan hasil pencocokan kurva terhadap data sinusoidal.

Metode pencocokan elips tidak hanya memberikan hasil yang tepat untuk input berupa data simulasi friksi statis, tetapi juga bisa mengukur besarnya friksi statis. Seperti pemaparan sebelumnya, besar friksi statis didapatkan dengan mengukur lebar elips sepanjang sumbu OP. Gambar 5 sampai Gambar 8 menunjukkan bagaimana elips yang terbentuk menggunakan metode pencocokan elips dengan input empat jenis data simulasi friksi statis.

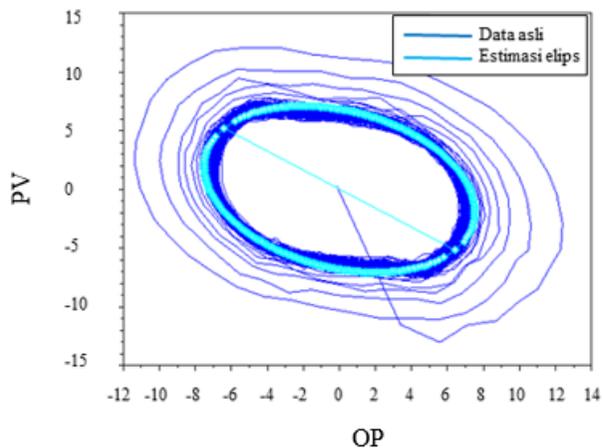
**Gambar 3 Hasil metode pencocokan kurva dengan input data sinusoidal**



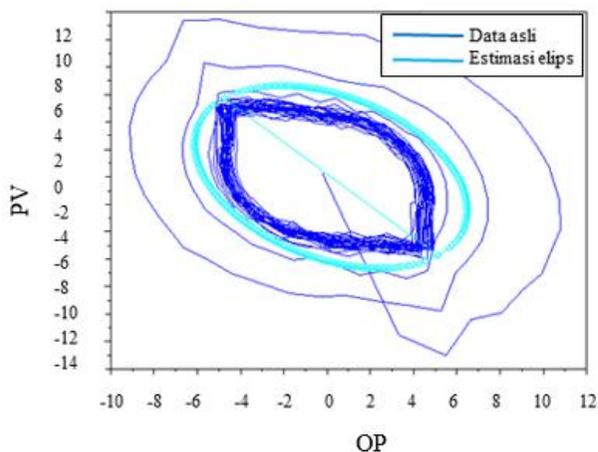
Gambar 4 Hasil metode pencocokan elips dengan input data sinusoidal



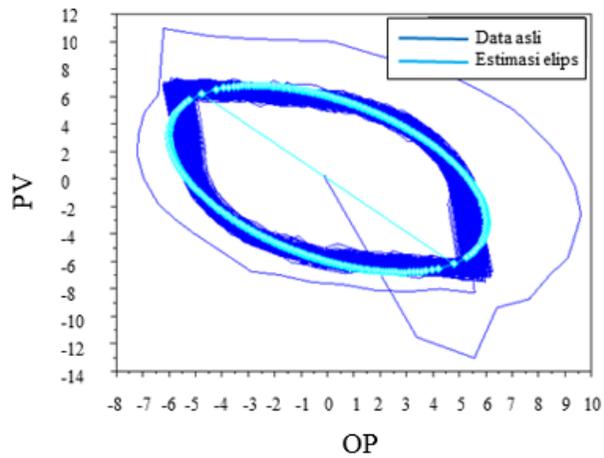
Gambar 5 Hasil metode pencocokan elips dengan input friksi statis (*pure deadband*)



Gambar 6 Hasil metode pencocokan elips dengan input friksi statis (*undershoot*)



Gambar 7 Hasil metode pencocokan elips dengan input friksi statis (*no offset*)



**Gambar 8 Hasil metode pencocokan elips dengan input friksi statis (*overshoot*)**

Selanjutnya adalah implementasi pada data industri pada Tabel 3. Data industri yang dipakai adalah data dari salah satu pabrik petrokimia.

Tabel 3 Hasil deteksi *stiction* dengan data industri

Katup	Span OP>25	IKG	IKL	SI	PK	S (%)	PE
FV1		0,606	0,271	0,730	S	9,913	S
FV2		0,093	0,184	0,685	S	8,227	S
FV3		0,001	Gaussian				
FV4		0,096	0,232	0,967	S	10,612	S
FV5		0,0002	Gaussian				
FV6		-0,001	Gaussian				
FV7	Y	Span OP>25%					
FV8		0,165	0,230	0,860	S	9,588	S
FV9		0,003	Gaussian				
FV10		0,007	0,332	0,756	S	1,221	S
LV1		-0,003	Gaussian				
LV2		-0,003	Gaussian				
LV3		0,0001	Gaussian				
LV4		0,003	Gaussian				
LV5	Y	Span OP>25%					
LV6	Y	Span OP>25%					
LV7	Y	Span OP>25%					
LV8	Y	Span OP>25%					
LV9	Y	Span OP>25%					
LV10	Y	Span OP>25%					
LV11		0,026	0,205	0,721	S	6,348	S
LV12		0,001	Gaussian				
PV1		0,044	0,199	0,598	U	3,873	S
PV2		0,019	0,141	0,944	S	1,047	S
PV3		0,031	0,024	0,867	S	0	NS
PV4	Y	Span OP>25%					
PV5		0,023	0,155	0,920	S	0,042	S
PV6		0,003	Gaussian				
PV7		0,006	0,186	0,586	U	5,922	S
PV8	Y	Span OP>25%					
PV9		0,008	0,140	0,866	S	2,527	S
PV10	Y	Span OP>25%					
PV11		0,020	0,125	0,731	S	10,181	S
PV12		0,142	0,344	0,924	S	10,723	S
PV13	Y	Span OP>25%					
PV14	Y	Span OP>25%					

Keterangan:

PK = pencocokan kurva

PE = pencocokan elips

SI = friksi statis *index* pada pencocokan kurva

S (%) = besar friksi statis pada pencocokan elips

S = hasil yang menunjukkan friksi statis

NS = hasil yang menunjukkan tidak friksi statis

U = hasil tidak diketahui

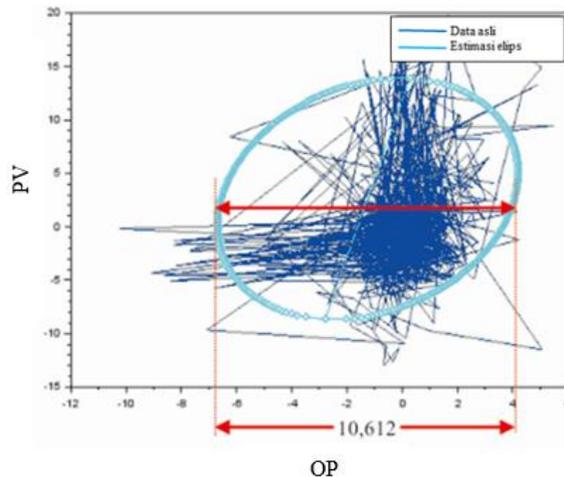
Tabel 3 menunjukkan hasil implementasi kedua metode deteksi friksi statis pada data industri. Sebelum masuk pada tahapan deteksi friksi statis, data ini terlebih dahulu diseleksi dari jangkauan OP. Jika jangkauan OP lebih dari 25% maka tidak dilanjutkan dengan deteksi friksi statis, karena menurut Choudhury [8], nilai OP lebih dari 25% menunjukkan ketidaklinieran pada katup karena karakteristik bawaannya. Jika *span* OP kurang dari 25%, deteksi friksi statis akan dilakukan.

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan adanya perbedaan pada deteksi friksi statis menggunakan metode pencocokan kurva dan pencocokan elips. Pada pencocokan kurva, terdapat dua hasil tidak diketahui dari empat belas katup yang dianalisis, namun dengan pencocokan elips, kedua katup ini terdeteksi *stiction*. Perbedaan juga muncul pada katup PV3 di mana pada pencocokan elips terdeteksi tidak friksi statis, namun pada pencocokan kurva terdeteksi friksi statis. Meskipun demikian, pada sebagian besar katup yang dianalisis, kedua metode ini memberikan hasil yang sama yaitu sebelas dari total empat belas katup. Tabel 4 menunjukkan kesimpulan hasil dari implementasi data industri.

**Tabel 4 Kesimpulan hasil deteksi *stiction* dengan data industri**

Kesimpulan	Pencocokan Kurva	Pencocokan Elips
Friksi statis	12	13
Tidak terjadi friksi statis	0	1
Tidak diketahui	2	0

Seperti dipaparkan di awal, kelebihan lain yang dimiliki metode pencocokan elips adalah dapat menghitung besar dari friksi statis. Besar friksi statis ini diukur dengan menghitung lebar elips estimasi searah sumbu OP. Gambar 9 menunjukkan bagaimana mengukur besar friksi statis menggunakan metode pencocokan elips pada katup FV4.



Gambar 9 Hasil metode pencocokan elips pada katup FV4

### 3 Kesimpulan

Dari komparasi yang dilakukan pada deteksi friksi statis menggunakan metode pencocokan kurva dan pencocokan grafis yang sama-sama menggunakan teknik pencocokan grafis, didapatkan karakteristik dari masing-masing metode. Komparasi ini dilakukan dengan beberapa data simulasi dan implementasi pada data industri.

Dari hasil simulasi, menunjukkan metode pencocokan kurva kurang dapat memberikan hasil yang tepat. Beberapa data yang seharusnya terbaca friksi statis terdeteksi tidak friksi statis. Demikian juga sebaliknya. Selain itu, terdapat beberapa data friksi statis yang masuk dalam kategori tidak diketahui pada metode ini. Hasil sebaliknya diberikan oleh metode pencocokan elips. Metode ini memberikan hasil yang tepat pada semua data simulasi. Dengan demikian, pada data simulasi disimpulkan bahwa pencocokan elips lebih baik daripada pencocokan kurva.

Meskipun memberikan perbedaan yang cukup signifikan pada data simulasi, kedua metode deteksi friksi statis ini memberikan hasil yang hampir sama pada implementasi data industri. Jadi, dapat disimpulkan bahwa kedua metode ini dapat diaplikasikan pada industri untuk mendeteksi friksi statis tentunya dengan batasan-batasan tertentu.

### 4 Daftar Pustaka

- [1] Zakharov, Alexey, Elena Zattoni, Lei Xie, Octavio Pozo Garcia, and Sirkka-Liisa Jämsä-Jounela. "An autonomous valve stiction detection system based on data characterization." *Control Engineering Practice* 21, no. 11 (2013): 1507-1518.
- [2] Rossi, M., & Scali, C, "A comparison of techniques for automatic detection of stiction: simulation and application to industrial data," *Journal of Process Control*, 15(5), 505-514, 2005.
- [3] Jelali, M., & Huang, B. (Eds.), *Detection and diagnosis of friksi statis in control loops: state of the art and advanced methods*. London: Springer Science & Business Media, 2009.

- [4] He, Q. P., Wang, J., Pottmann, M., & Qin, S. J., "A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops," *Industrial & engineering chemistry research*, 2007, 46(13), 4549-4560.
- [5] K. Daniel, "Implementasi Deteksi Friksi statis pada Katup Kontrol Berbasis Metode Pencocokan Grafis," Skripsi, Universitas Gadjah Mada, 2015.
- [6] Choudhury, M. S., Shah, S. L., & Thornhill, N. F., "Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics," *Automatica*, 2004, 40(10), 1719-1728.
- [7] Choudhury, M. S., Shah, S. L., Thornhill, N. F., & Shook, D. S., "Automatic detection and quantification of stiction in control valves," *Control Engineering Practice*, 2006, 14(12), 1395-1412.
- [8] Shoukat-Choudhury, S. M. A. A., Shah, S. L., & Thornhill, N. F., *Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction*, London: Springer Science & Business Media, 2008.
- [9] Choudhury, MAA Shoukat, Nina F. Thornhill, and Sirish L. Shah. "Modelling valve stiction." *Control engineering practice* 13, no. 5 (2005): 641-658.