Prosiding Seminar Sains dan Teknologi FMIPA Unmul
Vol. 1 No. 1 Juli 2016, Samarinda, Indonesia

ISSN : 2528 - 0988

ANALISIS KAITAN KOEFISIEN GESEK DAN PELUANG PEMBERSIHAN PIPA DENGAN *FOAM PIG*

Fenny Setyarini[1,*], Adrianus Inu Natalisanto[2]
[1]Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Fakultas MIPA, Universitas Mulawarman
[2]Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Mulawarman
[*]Corresponding author: fennysetyarini.011 @gmail.com

Abstrak Telah dilakukan kajian teori dan eksperimen kaitan koefisien gesekan kinetik dan peluang pembersihan. Kajian teori dilakukan dengan cara: pertama, menebak pola sebaran data secara matematis dan kedua, mengajukan asumsi yang mengaitkan perubahan koefisien gesekan kinetik dengan jumlah pengulangan pembersihan dan peluang pembersihan. Eksperimen dilakukan dengan cara menggelincirkan *foam pig* dalam pipa simulasi yang dilekati kotoran berupa butiran-butiran tanah liat. Dari kajian teori diperoleh kaitan antara koefisien gesekan kinetik dan jumlah pengulangan pembersihan dengan peluang pembersihan terungkap sebagai parameter di dalam kaitan tersebut atau berbanding lurus dengan koefisien gesekan kinetik. Dari eksperimen dapat dibuktikan keterkaitan ketiganya.

Kata kunci Koefisien gesekan kinetik, peluang pembersihan, jumlah pengulangan pembersihan.

Pendahuluan

Minyak dan gas merupakan salah satu sumber energi yang sangat banyak dipergunakan di negara industri. Kenaikan harga minyak yang kian melonjak 10 tahun terakhir, menyebabkan perusahaan-perusahaan minyak berusaha untuk mengoptimalkan produksinya, yakni salah satunya lewat pemeliharaan pipa untuk menghilangkan endapan-endapan yang dapat menurunkan tingkat produksi.

Pemeliharaan pipa yang sering dilakukan adalah dengan meluncurkan *pig* ke dalam pipa. Peluncuran tersebut dengan mneggunakan tekanan udara atau tekanan air. Penyelidikan kaitan antara koefisien gesek kinetik, jumlah pengulangan pembersihan dan peluang pembersihan pada peristiwa peluncuran foam pig di dalam pipa merupakan hal menarik untuk dikaji. Oleh karena itu, di dalam makalah ini, akan dipaparkan kajian teori dan percobaan dengan perangkat simulasi.

Gaya Gesekan

Gaya gesekan ialah gaya yang timbul akibat gerakan relatif antara dua permukaan yang bersinggungan sedemikian hingga akibat persinggungan tersebut gerakan yang satu terhadap yang lain menjadi tidak leluasa dan mengalami hambatan. Semakin lekat atau kuat persinggungan tersebut, maka semakin besar gaya gesekannya [5].

Gaya gesekan terbagi atas 2 macam, yaitu gaya gesekan statik dan gaya gesekan kinetik. Gaya gesekan statik adalah gaya gesekan yang bekerja di antara dua permukaan yang saling diam satu terhadap yang lain, misalkan permukaan benda dengan lantai.

Gaya gesekan kinetik adalah gaya gesekan yang bekerja di antara dua permukaan yang saling bergerak relatif. Bila permukaan-permukaan tersebut kering atau tanpa pelumas, maka gaya gesekan tersebut tidak bergantung pada luas permukaan kontak (dalam batas yang cukup lebar), besarnya sebanding dengan gaya normal, dan tidak bergantung pada laju relatif gerak permukaan yang satu di atas permukaan lainnya [3].

Gaya gesekan statis f_s mempunyai nilai maksimum $f_{s,\max}$:

$$f_{s,\max} = «_s F_N \qquad (1)$$

dengan $«_s$ adalah koefisien gesek statis dan F_N adalah besarnya gaya normal pada benda dari permukaan. Jika benda mulai bergeser di sepanjang permukaan, magnitudo gaya gesekan berkurang dengan cepat sampai pada nilai f_k yang diberikan oleh persamaan:

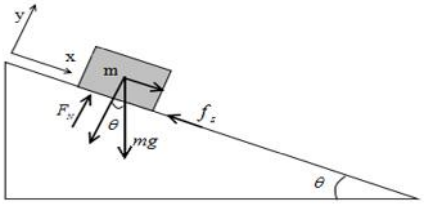
$$f_k = «_k F_N \qquad (2)$$

dengan $«_k$ adalah koefisien gesek kinetik.

ISSN : 2528 - 0988

Penentuan Koefisien Gesekan Kinetik dengan Bidang Miring

Penentuan koefisien gesek kinetik dapat dilakukan dengan menggelincirkan balok pada bidang miring. Diandaikan bahwa sebuah balok tak bergerak berada pada bidang miring kasar dengan sudut kemiringan θ. Gaya-gaya yang bekerja pada balok tersebut adalah gaya gravitasi mg, gaya gesekan statik f_s dan gaya normal F_N. Sketsa gaya-gaya yang bekerja pada benda tersebut diperlihatkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Gaya-gaya yang bekerja pada sebuah balok pada bidang miring yang kasar[6].

Bila balok tersebut dalam keadaan tepat mulai meluncur untuk sudut kemiringan tertentu, maka sudut kemiringan bidang miring tersebut merupakan sudut kritis θ_c. Untuk sudut kemiringan bidang kurang dari sudut kritis tersebut, balok berada dalam kesetimbangan statik. Dengan memilih sumbu x sejajar terhadap bidang miring dan sumbu y tegak lurus terhadap bidang tersebut, dapat dirumuskan persamaan:

$$\sum F_y = F_N - mg\cos\theta = 0 \qquad (3)$$

dan

$$\sum F_x = mg\sin\theta - f_s = 0 \qquad (4)$$

Penggabungan persamaan (3) dan (4) akan memberikan persamaan:

$$f_s = mg\sin\theta = \frac{F_N}{\cos\theta}\sin\theta = F_N\tan\theta \qquad (5)$$

Gaya gesekan statik akan maksimum pada sudut kritis θ_c sehingga berlaku persamaan (1). Penggabungan persamaan (1) dan (5) memberikan persamaan:

$$\mu_s = \tan\theta_c \qquad (6)$$

Persamaan (6) mengungkapkan bahwa koefisien gesekan statik sama dengan tangen sudut kemiringan ketika balok tepat mulai meluncur [6].

Balok tersebut akan meluncur ke bawah bidang miring dengan percepatan a bila sudut kemiringan bidang lebih besar daripada sudut kritis θ_c. Gaya gesekan yang dialami balok tersebut akan sesuai dengan persamaan (2), dan dengan persamaan (3) akan menjadi:

$$F_x = mg\sin\theta - \mu_k F_N = ma_x \qquad (7)$$

Selanjutnya, dengan mensubstitusikan $mg\cos\theta$ untuk F_N ke persamaan (7), akan diperoleh persamaan koefisien gesekan kinetik:

$$\mu_k = tg\theta - \frac{a}{g\cos\theta} \qquad (8)$$

Pengisian $\frac{1}{\cos\theta} = \sqrt{1+\mu_s^2}$ ke persamaan (8), koefisien geseknya menjadi

$$\mu_k = tg\theta - \frac{a}{g}\sqrt{1+\mu_s^2} \qquad (9)$$

Peluang dan Kemajuan Pembersihan

Dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan pembersihan daerah dalam pipa dengan cara menggelincirkan *foam pig*. Selubung *foam pig* yang menggelincir di dalam pipa tersebut dianggap dapat membawa kotoran dalam pipa yang bersentuhan dengannya. Bila kotoran di dalam pipa tersebut merupakan butir-butiran tanah yang tersebar secara acak di permukaan dalam pipa tersebut dan memiliki gaya adhesi yang beragam terhadap selubung *foam pig* dan permukaan dalam pipa, maka setiap kotoran tersebut belum tentu dapat dirontokan oleh *foam pig*. Karena itu, dapat dipandang bahwa peristiwa perontokan kotoran oleh *foam pig* bersesuaian dengan peristiwa pembersihan pipa oleh *foam pig* dan peluang terjadinya peristiwa pembersihan tersebut disebut sebagai peluang pembersihan. Peluang Pembersihan dapat didefinisikan sebagai:

$$P(B_q) = 1 - P(G_q) \qquad (10)$$

dengan $P(G_q)$ menyatakan peluang kotoran tersisa.

Peristiwa pembersihan pipa terjadi ketika *foam pig* diluncurkan di dalam pipa. Bila pembersihan tersebut dilakukan secara berulang maka kotoran-kotoran yang rontok menjadi semakin berkurang seiring dengan semakin banyak dilakukannya peluncuran *foam pig* tersebut. Peristiwa rontoknya kotoran tersebut merupakan peristiwa komplementer dari peristiwa kemajuan pembersihan pipa. Karena itu, kemajuan pembersihan (J) dapat dinyatakan sebagai jumlah kumulatif cacah rontoknya kotoran pada setiap ulangan

ISSN : 2528 - 0988

penggelinciran terhadap cacah banyaknya kotoran semula, atau dapat dinyatakan sebagai.

$$J_N = \frac{1}{C_1}\sum_{i=1}^{N} Cr_i \qquad (11)$$

dengan J_N adalah kemajuan pembersihan ke-N.

Metodologi

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu meteran, jangka sorong, dan s*topwatch*. Meteran digunakan untuk mengukur tinggi peletakan pipa simulasi, jangka sorong digunakan untuk mengukur diameter pipa simulasi dan *stopwatch* digunakan untuk mengukur waktu gelinciran *foam pig*.

Penelitian ini menggunakan *foam pig* yang berdiameter 4 inci, tiga jenis plat, dan tanah liat yang digunakan sebagai pengotor di dalam pipa simulasi. Tiga jenis plat tersebut yaitu seng, alumunium, dan plastik (*fiber excel flow polypropylene*).

Di dalam penelitian ini dibuat pipa simulasi yang dibersihkan dengan *foam pig* yang diluncurkan dengan menggunakan gaya pendorong berupa tarikan gravitasi di bidang miring.

Data yang dianalisa berasal dari data primer peluncuran *foam pig* dengan menggunakan pipa simulasi yang beragam untuk menentukan nilai koefisien gesekan. Karena besar tarikan gravitasi pada *foam pig* hanya bergantung pada besar sudut kemiringan, maka sudut kemiringan tempat *foam pig* meluncur juga diragamkan. Pengukuran dilakukan dengan sudut 40°, 50°, 60° dan 70°.

Hasil dan Analisa Eksperimen

Pada proses pembersihan pipa dengan menggelincirkan *foam pig* ke dalam pipa simulasi yang terjadi adalah gerakan antara dua permukaan yang saling berinteraksi antara permukaan *foam pig* dan permukaan bagian dalam pipa. Pada saat pipa diberi pengotor berupa tanah liat, maka gesekan yang terjadi adalah gesekan antara permukaan *foam pig* dengan permukaan tanah liat tersebut. Hal ini mengakibatkan kotoran yang ada di dalam pipa simulasi lama-lama akan tergerus saat *foam pig* berkali-kali diluncurkan dengan bidang miring (diperlihatkan pada Tabel 1 dan Tabel 2).

Tabel 1. Nilai-nilai Koefisien Gesek Statik dan Koefisien Gesek Kinetik Secara Eksperimen untuk Seng 40°

θ	N	μs ± Δμs	μk ± Δμk	% Peluang Pembersihan
	1		0,771 ± 0,002	22,07
	2		0,762 ± 0,002	5,31
	3		0,790 ± 0,002	26,17
	4		0,794 ± 0,002	16,46
	5		0,793 ± 0,002	13,64
	6		0,789 ± 0,002	19,3
40	7	0,809 ± 0,002	0,775 ± 0,002	8,70
	8		0,617 ± 0,002	11,9
	9		0,507 ± 0,002	5,41
	10		0,386 ± 0,002	8,57
	11		0,460 ± 0,002	3,13
	13		0,413 ± 0,002	14,29
	14		0,120 ± 0,002	4,17

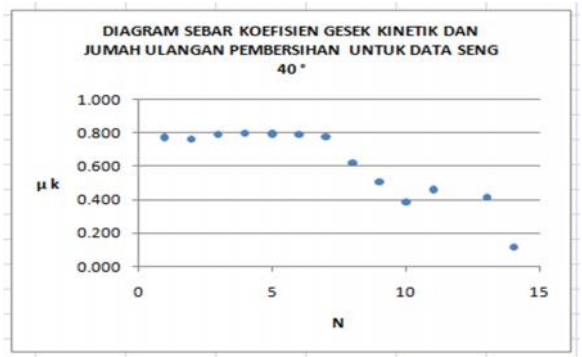
Tabel 2. Nilai-nilai Koefisien Gesek Statik dan Koefisien Gesek Kinetik Secara Eksperimen untuk Alumunium 45°

θ	N	μs ± Δμs	μk ± Δμk	% Peluang Pembersihan
	1		0,902 ± 0,002	24,83
	2		0,866 ± 0,002	33,03
	3		0,806 ± 0,002	35,62
45	4	0,970 ± 0,002	0,839 ± 0,002	34,04
	5		0,904 ± 0,002	58,06
	7		0,810 ± 0,002	33,33
	8		0,675 ± 0,002	50

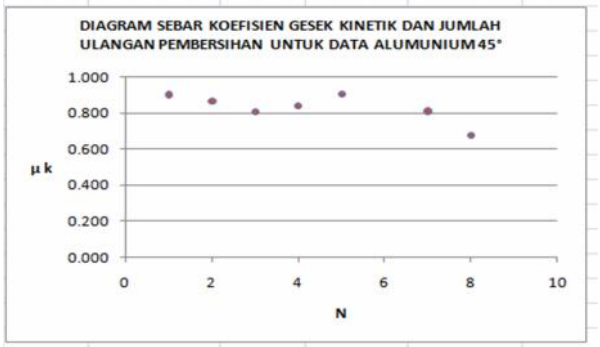
Berdasarkan tabel 1 dan tabel 2, nilai koefsien gesek kinetik dan jumlah ulangan pembersihan kemudian dibentuk diagram

ISSN : 2528 - 0988

sebaran data seperti yang diperlihatkan Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Diagram Sebar Koefisien Gesekan Kinetik vs Jumlah Ulangan Pembersihan pada Data Seng 40°



Gambar 3. Diagram Sebar Koefisien Gesekan Kinetik vs Jumlah Ulangan Pembersihan Pada Data Alumunium 45°

Diagram sebaran, yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3, memperlihatkan bahwa terdapat korelasi antara koefisien gesekan kinetik dan jumlah pengulangan pembersihan, tetapi korelasi tersebut bukanlah korelasi yang linear melainkan korelasi nonlinear (parabola) yaitu:

$$\mu_k = a - bN^2 \qquad (12)$$

dengan *a* adalah tetapan yang sebanding dengan koefisien gesekan kinetik dan b adalah tetapan kesebandingan.

Hasil dan Analisa Teori

Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, dapat dilihat bahwa semakin banyak dilakukan penggelinciran, maka nilai koefisien geseknya semakin kecil sehingga persentase kemajuan pembersihannya menjadi semakin tinggi. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa perubahan nilai koefisien gesek setara dengan peluang pembersihan rata-rata dan juga banyaknya pengulangan penggelinciran *foam pig* di dalam pipa dapat dinyatakan sebagai :

$$-\Delta\mu_k = k\overline{P(B_q)}N \qquad (13)$$

dengan $\Delta\mu_k$ adalah perubahan nilai koefisien gesek kinetik, k adalah konstanta, $\overline{P(B_q)}$ adalah peluang pembersihan rata-rata, dan N adalah jumlah pengulangan pembersihan

dengan

$$\Delta\mu_k = \mu_k(N + \Delta N) - \mu_k(N) \qquad (14)$$

sehingga

$$d\mu_k = -\frac{k\overline{P(B_q)}N}{\Delta N}d \qquad (15)$$

selanjutnya

$$\int_{\mu-\mu_k'}^{\mu_k(N)} d \;= -\frac{k\overline{P(B_q)}}{\Delta N}\int_{N-0}^{N} N\,d \qquad (16)$$

yang menghasilkan

$$\mu_k(N) = \mu_k' - \frac{k\overline{P(B_q)}}{2\Delta N}N^2 \qquad (17)$$

Karena

$$c = \frac{k\overline{P(B_q)}}{2\Delta N}\;;\Delta N = 1 \qquad (18)$$

Jadi, secara umum kaitan antara koefisien gesekan kinetik dan peluang pembersihan adalah

$$\mu_k = \mu_k' - cN^2 \qquad (19)$$

Dengan nilai μ_k' dan *c* konstanta-konstanta teoritis yang bersesuaian dengan persaman (17).

Untuk menentukan nilai N pada terapan industri maka persamaannya menjadi

$$N = \sqrt{\frac{\mu_0 - \mu_N}{c}} \qquad (20)$$

Penentuan Nilai Ketetapan μ_k' dan c

Penentuan nilai-nilai ketetapan ini dapat ditentukan dengan membuat plot antara μ_k dan N^2. Dengan nilai N^2 sebagai sumbu x dan μ_k sebagai sumbu y. N^2 adalah nilai dari jumlah pengulangan pembersihan dikuadratkan, sedangkan nilai μ_k adalah nilai koefisien gesek kinetik. Persamaan empiris yang muncul pada grafik inilah nilai μ_k dan N^2 yang bersesuaian dengan persamaan 19 seperti diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Koefisien Gesek Kinetik dan Konstanta c

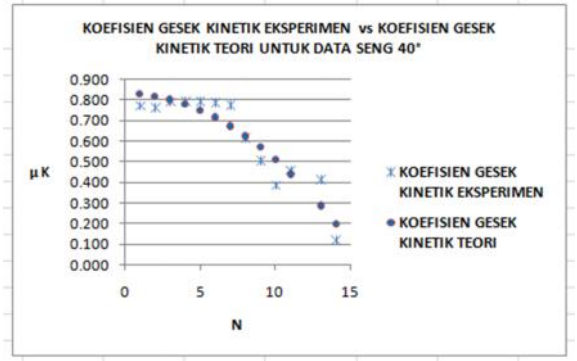
Bahan	Sudut	$\mu_k' \pm \sigma\mu_k'$	c ± σc
Seng	40	0,829 ± 0,0008	0,0032 ± 0,000009

ISSN : 2528 - 0988

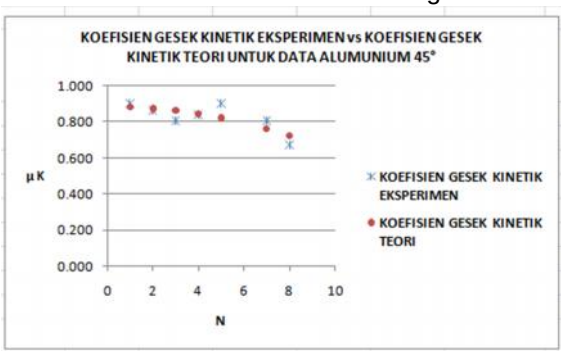
Bahan	Sudut	$\mu'_k \pm \sigma\mu'_k$	c ± σc
Alumunium	45	0,890 ± 0,0011	0,0025 ± 0,000036
	50	0,877 ± 0,0007	0,0009 ± 0,000005
Plastik	45	0,913 ± 0,0008	0,0010 ± 0,000005
	50	0,957 ± 0,0011	0,0056 ± 0,000018

Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Hasil Teori

Setelah didapatkan nilai μ'_k dan *c* pada metode regresi linier, kemudian dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (19). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai koefisien gesek kinetik secara teori. Setelah itu plot nilai koefisien gesek kinetik yang diperoleh secara eksperimen dengan nilai koefisien gesek kinetik yang diperoleh secara teori (Gambar 4 dan Gambar 5).



Gambar 4. Hasil Perbandingan Nilai Koefisien Gesek Kinetik Eksperimen dan Nilai Koefisien Gesek Kinetik Teori Untuk Data Seng Sudut 40°



Gambar 5. Hasil Perbandingan Nilai Koefisien Gesek Kinetik Eksperimen dan Nilai Koefisien Gesek Kinetik Teori Untuk Data Alumunium Sudut 45°

Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin sering dilakukan penggelinciran pada pipa maka semakin kecil koefisien gesek kinetiknya. Hal ini berarti persentase kemajuan pembersihnya semakin meningkat atau mendekati 100 % seiring banyaknya dilakukan penggelinciran.

Kaitan antara Koefisien Gesekan Kinetik dan Peluang Pembersihan

Dari Tabel 1 dan Tabel 2 dapat disimpulkan bahwa nilai peluang pembersihan dari peluncuran pertama ke peluncuran berikutnya bersifat acak (random). Keacakan tersebut patut diduga dipengaruhi oleh letak butiran-butiran tanah dan gaya adhesi pada permukaan *foam pig* dan pada permukaan dalam pipa tersebut. Karena butiran-butiran tanah di pemukaan bagian dalam pipa tersebar secara acak (random), maka nilai peluang pembersihan juga bersifat acak. Selain itu, keacakan nilai tersebut dapat pula disebabkan oleh keragaman gaya adhesi yang ditimbulkan dari selubung *foam pig* dan permukaan dalam pipa atau belum tentu terontokkannya oleh *foam pig* kotoran yang terdapat di dalam pipa.

Telah dibahas dalam subbab sebelumnya bahwa perubahan koefsien gesekan kinetik diasumsikan sebanding dengan peluang pembersihan rata-rata. Dengan menggunakan asumsi tersebut secara teori telah diturunkan persamaan (18). Selanjutnya lewat eksperimen persamaan tersebut telah dibuktikan bersesuaian dengan persamaan empiris (persamaan (12)) untuk $a=\mu'_k$ dan b=c. Di dalam persamaan (19) terdapat besaran c yang mengandung besaran fisis peluang pembersihan. Peluang pembersihan merupakan parameter dari persamaan (18). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa koefisien gesekan kinetik berkait dengan peluang pembersihan.

Dari Tabel 1 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa nilai peluang pembersihan bersifat acak. Meskipun demikian, keacakan tersebut tidak mempengaruhi pola sebaran titik data kaitan antara koefisien gesekan kinetik dan jumlah pengulangan pembersihan secara kuadratik (diperlihatkan dalam Gambar 4 dan Gambar 5). Keacakan tersebut tidak berpengaruh karena nilai tetapan kesebandingan (k) di dalam persamaan (18) bernilai cukup kecil.

ISSN : 2528 - 0988

Kesimpulan

Telah ditemukan bahwa kaitan antara koefisien gesekan kinetik dan jumlah pengulangan pembersihan merupakan kaitan kuadratik dengan peluang pembersihan sebagai parameter di dalam kaitan tersebut atau berbanding lurus dengan koefisien gesekan kinetik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Syahrin MT dari perusahaan PT. Kaliraya Sari, yang telah membimbing di lapangan terkait dengan proses *pigging*,dan kepada Laboratorium Fisika Dasar dan Laboratorium Elektronika & Instrumentasi FMIPA UNMUL yang telah memberikan ijin menggunakan alat-alat Laboratorium dan ruangan eksperimen.

Daftar Pustaka

[1] Cordell, Jim dan Vanzant, Hershel. 1990. *All about Pigging*. Steam system LT. New york
[2] Davidson, Robert. 2002. *An Introduction To Pipeline Pigging*. Pigging Products and Services Association. Halliburton Pipeline and Process Services
[3] Halliday D, dan Resnick. 2010. *Fisika Jilid 1 Edisi ke-7*. Erlangga : Jakarta
[4] Nurcahyo. 2011. *Rancang Bangun Simulator Fisik Fasilitas Pigging Serta Pemodelan dan Pengujian Karakteristik Foam Pig*. Thesis Program Studi Teknik Kimia, UNDIP. Semarang
[5] Soedojo, Peter. 1999. *Fisika Dasar*. Andi : Yogyakarta
[6] Tipler,A.Paul. 1996. *Fisika untuk Sains dan Teknik jilid 1*. Erlangga: Jakarta