

**PENERAPAN DIAGRAM KONTROL D^2 MAHALANOBIS
PADA PROSES PRODUKSI MINUMAN KEMASAN
RETURNABLE GLASS BOTTLE
(Studi Kasus di PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java)**

Muhammad Abid Muhyidin¹, Diah Safitri², Rita Rahmawati³

¹Mahasiswa Jurusan Statistika FSM Universitas Diponegoro

^{2,3}Staf Pengajar Jurusan Statistika FSM Universitas Diponegoro

ABSTRACT

Quality being one of the basic factors in choosing a product consumers. Therefore, an industry or a company should always maintain the quality of their products in order to get loyal customers and are able to survive in the competitive market. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java Limited Compay is one of the manufacturing company engaged in the beverage packaging industry and always trying to improve the quality for customer satisfaction. Although it has been to improve the quality, there are still defective product because it does not meet the quality characteristics. Monitoring the result of production process aims to determine whether the process is stable or not. D^2 Mahalanobis control chart is one of the control charts that can be used to monitor the production mismatch that is multivariate attributes. By using D^2 Mahalanobis control chart, beverage production process of returnable glass bottle (RGB) in Coca-cola Bottling Indonesia Central Java Limited Compay based on the characteristics of disability shows that the results have not yet stable and controllable. This is due to D^2 Mahalanobis control chart phase II there are 5 observations of 75 observations or 6.66 % identified uncontrolled observations

Keywords : Quality, Customer Satisfaction, Production Process, Multivariate attribute, D^2 Mahalanobis control chart, Returnable Glass Bottle (RGB).

1. PENDAHULUAN

Kualitas menjadi faktor dasar keputusan konsumen dalam banyak produk dan jasa. Akibatnya, kualitas adalah faktor kunci yang membawa keberhasilan bisnis, pertumbuhan, dan peningkatan posisi dalam persaingan. Konsumen merasa bahwa produk perusahaan tertentu jauh lebih baik kualitasnya daripada saingan-saingannya sehingga memutuskan untuk membelinya. Kualitas telah muncul sebagai strategi bisnis baru yang utama. Bagian dari strategi bisnis ini adalah perencanaan kualitas, analisis dan kontrol. Kualitas dapat memberikan pertumbuhan bisnis dan mempertinggi posisi persaingan bagi perusahaan (Montgomery, 2009).

Dalam industri manufaktur, salah satu upaya untuk meningkatkan kualitas produk adalah dengan memonitor proses produksi dengan diagram kontrol. Metode untuk memonitor proses produksi adalah dengan menggunakan *Statistical Process Control* (SPC). SPC biasa dipakai dalam perusahaan manufaktur. Penerapan SPC dalam industri manufaktur dilakukan karena banyak konsumen yang mengutamakan kualitas produk (Montgomery, 2009).

Menurut Mukhopadhyay (2008), diagram kontrol D^2 Mahalanobis merupakan salah satu diagram kontrol yang dapat digunakan untuk konsep multivariat khususnya multivariat atribut. Mukhopadhyay (2008) pernah membahas diagram kontrol D^2 Mahalanobis untuk perusahaan manufaktur dengan

menerapkan metode ini pada studi kasus cacat pengecatan, tetapi hanya melihat pengamatan mana yang terkendali dan belum sampai pada melihat kestabilan dan mencari variabel penyebab pengamatan tidak terkendali.

Diagram kontrol D^2 Mahalanobis memperhitungkan berbagai kategori cacat secara mendalam untuk meningkatkan sensitivitas dalam mendeteksi pergeseran. Oleh karena itu, untuk memahami kinerja keseluruhan proses dengan mempertimbangkan semua kategori cacat pada saat yang sama, diagram kontrol D^2 Mahalanobis sangat efektif sehingga memungkinkan diterapkan pada perusahaan manufaktur (Mukhopadhyay, 2008).

Penelitian ini menggunakan diagram kontrol D^2 Mahalanobis untuk diterapkan pada proses produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* di PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java dengan tujuan mengetahui stabilitas proses tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Manufaktur

Manufaktur berasal dari kata *manufacture* yang berarti membuat dengan tangan (manual) atau dengan mesin sehingga menghasilkan sesuatu barang. Secara umum dapat dikatakan bahwa manufaktur memproses satu atau beberapa bahan menjadi barang lain yang mempunyai nilai tambah yang lebih besar. (Heizer dan Render, 2010).

2.2 Proses Produksi Manufaktur Secara Umum

Returnable glass bottle atau yang biasa disingkat RGB adalah salah satu kemasan air minum yang terbuat dari botol kaca dengan sistem pengembalian botol ke perusahaan. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa perusahaan hanya menjual air minum saja kepada konsumen tidak beserta kemasannya (Buczynski, 2012).

2.3 Diagram Kontrol Multivariat Atribut

Analisis multivariat adalah metode analisis statistik yang digunakan untuk mengolah data secara bersama-sama dengan banyak variabel (Johnson dan Wichern, 2007). Data multivariat diperoleh dari pengukuran lebih dari satu karakteristik pada setiap individu dari anggota sampel. Sehingga, jika pemeriksaan obyek secara atribut dilakukan pada lebih dari satu karakteristik kualitas, diagram kontrol yang digunakan adalah diagram kontrol multivariat atribut (Mukhopadhyay, 2008).

2.4 Diagram Kontrol D^2 Mahalanobis

Metode Prinsip jarak mahalanobis adalah menghitung jarak di ruang multidimensional antara sebuah pengamatan dengan pusat dari semua pengamatan (Hair *et al.*, 2010). Untuk data atribut, diagram kontrol D^2 Mahalanobis memiliki konsep menghitung jarak proporsi jumlah ketidaksesuaian sebuah pengamatan terhadap rata-rata proporsi jumlah ketidaksesuaian dari seluruh pengamatan untuk setiap variable (Mukhopadhyay, 2008).

Misalkan ada m pengamatan dengan k variabel, maka $\mathbf{p}_r^T = [p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rk}]$ adalah vektor proporsi jumlah ketidaksesuaian pengamatan ke- r untuk setiap variabel terhadap jumlah sampel pada pengamatan ke- r (n_r) dengan r

= 1,2 ..., m dengan $\mathbf{p}_r \sim \text{multinomial}[\bar{\mathbf{p}}, n_r]$, sehingga diperoleh $\sum_{s=1}^k p_{rs} = 1$, karena itu matriks varian dan kovarian dari vektor \mathbf{p}_r^T adalah matriks singular (Mukhopadhyay, 2008). Matriks singular adalah matriks persegi yang harga determinannya sama dengan nol (Anton dan Rorres, 2014).

Menurut Mukhopadhyay (2008), perhitungan jarak mahalanobis untuk masing-masing pengamatan adalah sebagai berikut :

$$D_r^2 = (\mathbf{p}_r - \bar{\mathbf{p}})^T \Sigma_r^{-1} (\mathbf{p}_r - \bar{\mathbf{p}}) \quad (1)$$

dengan :

$$\mathbf{p}_r = [p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rk}]^T$$

$$\bar{\mathbf{p}} = [\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_k]^T$$

$$\Sigma_r^{-1} = \text{generalized inverse matriks } \Sigma_r$$

$$\Sigma_r = \text{matriks varian kovarian dari vektor } \mathbf{p}_r \text{ dan nilainya sama dengan}$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} n_r^{-1} \sum & & & & \\ \bar{p}_1(1 - \bar{p}_1) & -\bar{p}_1\bar{p}_2 & \dots & -\bar{p}_1\bar{p}_k & \\ -\bar{p}_1\bar{p}_2 & \bar{p}_2(1 - \bar{p}_2) & \dots & -\bar{p}_2\bar{p}_k & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ -\bar{p}_1\bar{p}_k & -\bar{p}_2\bar{p}_k & \dots & \bar{p}_k(1 - \bar{p}_k) & \end{bmatrix}$$

Rao dan Bhimasankaram (1992) dalam Mukhopadhyay (2008) menyatakan bahwa Σ merupakan matriks singular sehingga *generalized inverse* dari matriks Σ adalah :

$$\Sigma^{-1} = \text{diag}[\bar{p}_1^{-1}, \bar{p}_2^{-1}, \dots, \bar{p}_k^{-1}]$$

Menurut Mardia, et al., (1995), matriks Σ^{-1} adalah *g-inverse* (*generalized inverse*) dari matriks Σ jika

$$\Sigma \Sigma^{-1} \Sigma = \Sigma$$

dan sebuah *generalized inverse* selalu ada meskipun secara umum tidak unik.

Dari penjelasan Mukhopadhyay (2008) diperoleh matriks Σ_r^{-1} sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Sigma_r^{-1} &= n_r \Sigma^{-1} \\ &= n_r \text{diag}[\bar{p}_1^{-1}, \bar{p}_2^{-1}, \dots, \bar{p}_k^{-1}] \\ &= \begin{bmatrix} \frac{n_r}{\bar{p}_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{n_r}{\bar{p}_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{n_r}{\bar{p}_k} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

sehingga persamaan jarak mahalanobis untuk masing-masing pengamatan adalah :

$$\begin{aligned} D_r^2 &= [(p_{r1} - \bar{p}_1)(p_{r2} - \bar{p}_2) \dots (p_{rk} - \bar{p}_k)] \begin{bmatrix} \frac{n_r}{\bar{p}_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{n_r}{\bar{p}_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{n_r}{\bar{p}_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{r1} - \bar{p}_1 \\ p_{r2} - \bar{p}_2 \\ \vdots \\ p_{rk} - \bar{p}_k \end{bmatrix} \\ &= \left[\frac{n_r(p_{r1} - \bar{p}_1)}{\bar{p}_1} \frac{n_r(p_{r2} - \bar{p}_2)}{\bar{p}_2} \dots \frac{n_r(p_{rk} - \bar{p}_k)}{\bar{p}_k} \right] \begin{bmatrix} p_{r1} - \bar{p}_1 \\ p_{r2} - \bar{p}_2 \\ \vdots \\ p_{rk} - \bar{p}_k \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$D^2_r = \sum_{s=1}^k \frac{n_r(p_{rs} - \bar{p}_s)^2}{\bar{p}_s} \quad (2)$$

dan perhitungan nilai D^2 (Mahalanobis *Distance*) antara p_r dan \bar{p} adalah sebagai berikut :

$$D^2_{(p_r, \bar{p})} = n_r (\mathbf{p}_r - \bar{\mathbf{p}})^T \Sigma_r^{-1} (\mathbf{p}_r - \bar{\mathbf{p}})$$

Menurut Mukhopadhyay (2008) yang berdasar pada konsep diagram kontrol D^2 Mahalanobis sesuai perhitungan statistik T^2 Hotelling, yaitu jika $X \sim N_k[\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}]$, mempunyai vektor rata-rata \bar{X} serta S merupakan matriks varians kovarians dari x dengan ukuran sampel n , maka

$$(n-1)(\bar{X} - \boldsymbol{\mu})^T S^{-1}(\bar{X} - \boldsymbol{\mu}) \sim T^2_{k, n-1} \quad (3)$$

sehingga diperoleh persamaan:

$$D^2_{(p_r, \bar{p})} \sim T^2_{k-1, n_r} \quad (4)$$

Mukhopadhyay (2008) menjelaskan bahwa derajat bebas pertama untuk distribusi pada persamaan (4) adalah $k-1$ bukan k seperti distribusi pada persamaan (3) karena $\sum_{s=1}^k p_{rs} = 1$. Sedangkan derajat bebas kedua adalah n_r bukan $n_r - 1$ karena merupakan penaksiran tak bias untuk populasi dengan ukuran sampel sebanyak n_r . Batas kontrol untuk diagram kontrol D^2 Mahalanobis dengan tingkat signifikansi α adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{BKA (Batas Kendali Atas)} &= T^2_{k-1, n_r, \alpha} \\ &= \left| \frac{(n_r(k-1))}{(n_r-k+2)} \right| F_{k-1, n_r-k+2, (\alpha)} \\ \text{BKB (Batas Kendali Bawah)} &= 0 \end{aligned}$$

2.5 Statistical Process Control (SPC)

Statistical Process Control dibagi menjadi 2 fase pengendalian. Diagram kontrol fase I dilakukan pada data sampel proses produksi periode sekarang dan periode sebelumnya untuk memperoleh taksiran parameter. Oleh karena itu, penerapan diagram kontrol fase I dilakukan secara iteratif sampai menunjukkan keadaan proses yang stabil atau terkontrol. Sedangkan penerapan diagram kontrol fase II dilakukan untuk pengendalian proses produksi pada periode berikutnya dengan menggunakan taksiran parameter yang telah diperoleh pada fase I. Karena nilai taksiran parameter nantinya diperoleh pada penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase I, maka pada fase II digunakan BKA = $\chi^2_{(\alpha, k)}$ (Montgomery, 2009).

3. METODOLOGI PENELITIAN

Data yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah data sekunder tentang cacat pada proses produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* (RGB) ukuran 295 ml pada PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java sejak tanggal 3 September 2012 sampai dengan tanggal 31 Oktober 2012.

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini merupakan frekuensi karakteristik kualitas atribut jenis cacat pada bagian *bottling* proses produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* (RGB) 295 ml, beserta atribut yang tidak cacat, yaitu :

1. *Decrater* (Pemisahan Botol dari Krat)
Jenis kecacatan utama yang terjadi pada proses pemisahan botol dari krat menggunakan gripper karet dengan sistem elektropneumatik adalah keretakan atau pecahnya botol (X_1).
2. *Bottle Washer* (Pencuci Botol)
Jenis kecacatan utama yang terjadi pada proses pencucian botol adalah RGB masih kotor setelah melalui proses pencucian (X_2).
3. Proses *Filling* (Pengisian)
Jenis kecacatan utama yang terjadi pada proses *filling* adalah terdapat RGB dengan volume *beverage* kurang atau lebih dari 295 ml (X_3).
4. Proses *Crowning* (Penutupan Botol)
Jenis kecacatan utama yang terjadi pada proses *crowning* adalah terdapat RGB yang tak berpenutup atau *crown* (tutup botol) yang tidak terpasang dengan baik (X_4).
5. *Data Coding* (Pemberian Kode)
Jenis kecacatan utama yang terjadi pada proses *data coding* adalah terdapat RGB yang tidak tertera kode produksi (X_5).
6. Produk Terkendali
RGB yang tidak memiliki cacat dan sudah sesuai standar perusahaan (X_6).

Tahapan analisis data yang dilakukan dalam penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis pada proses produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* (RGB) ukuran 295 ml di PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java memiliki urutan sebagai berikut :

1. Menghitung proporsi cacat terlebih dahulu tiap pengamatan tiap variabel.
2. Menghitung rata-rata proporsi tiap variabel.
3. Mencari nilai D^2 Mahalanobis dengan menggunakan persamaan (1).
4. Membuat diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase I berdasarkan data kecacatan bulan September pada produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* (RGB) ukuran 295 ml di PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java.
5. Pada diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase I, jika terdapat observasi yang tidak terkendali maka observasi tersebut dihilangkan dan dilakukan perhitungan lagi sampai proses dalam keadaan terkendali.
6. Setelah proses terkendali akan diperoleh taksiran parameter yang akan digunakan untuk mengontrol proses produksi pada fase II.
7. Membuat diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II berdasarkan data kecacatan bulan Oktober pada produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* (RGB) ukuran 295 ml di PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java dengan menggunakan taksiran parameter yang diperoleh dari diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase I yang sudah terkendali.
8. Dari penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II, dapat ditarik kesimpulan tentang hasil stabilitas proses produksi.

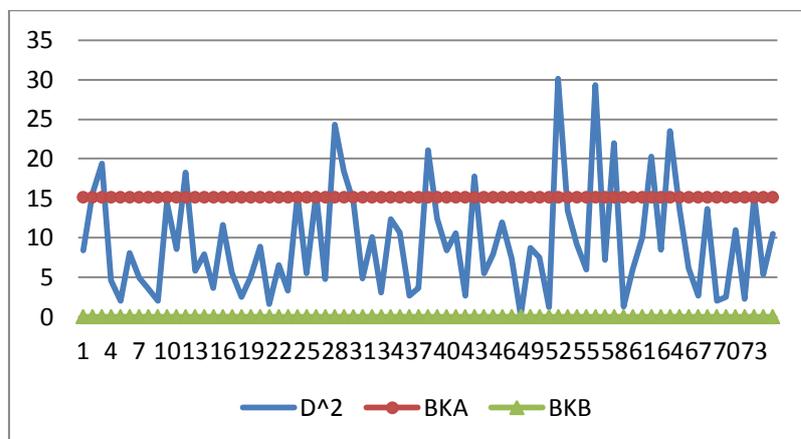
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penerapan Diagram Kontrol D^2 Mahalanobis Fase I

Penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis pada fase I menggunakan data cacat produksi pada bulan September 2012. Sesuai dengan konsep perhitungan nilai jarak dalam diagram kontrol D^2 Mahalanobis yang telah dijelaskan sebelumnya, diperoleh diagram kontrol D^2 Mahalanobis seperti pada Gambar 1. Diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase I menggunakan $\alpha = 0.01$ dan $BKA = \frac{(97200(6-1))}{(97200-6+2)} F_{6-1, 97200-6+2, (0.01)}$ dengan n_r merupakan jumlah sampel masing-masing pengamatan, yaitu 97200 dan k adalah jumlah variabel yang digunakan termasuk variabel produk yang tidak cacat, yaitu enam. Nilai BKA yang ditunjukkan pada Gambar 1 adalah 15.100621 dan BKB adalah 0. Dengan nilai BKA dan BKB tersebut, terlihat pada Gambar 5 ada pengamatan yang di luar batas kendali, yaitu pengamatan 2, 3, 12, 24, 26, 28, 29, 38, 43, 52, 56, 58, 62, 64 dan 73.

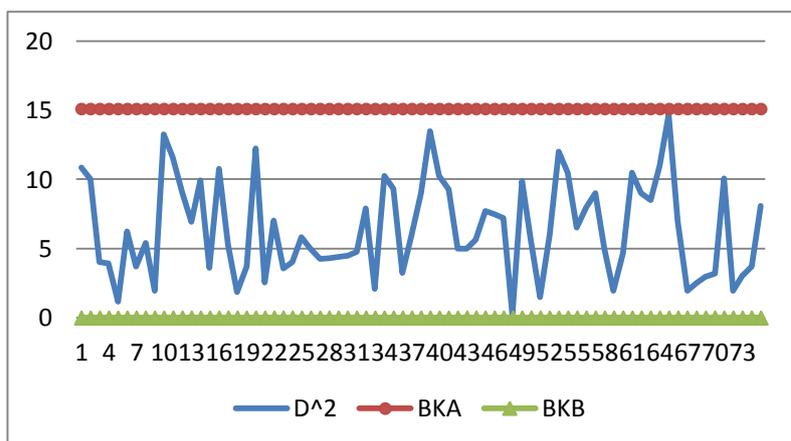
Tabel 1 Pengamatan tanda tidak terkendali Fase I iterasi I

Pengamatan ke-	Nilai D^2	BKA
2	15.482181	15.100621
3	19.418122	15.100621
12	18.235736	15.100621
24	15.338736	15.100621
26	15.618144	15.100621
28	24.287293	15.100621
29	18.399977	15.100621
38	21.080511	15.100621
43	17.769373	15.100621
52	30.141480	15.100621
56	29.339173	15.100621
58	21.988962	15.100621
62	20.249482	15.100621
64	23.521381	15.100621
73	15.307042	15.100621



Gambar 1 Diagram Kontrol D^2 Mahalanobis Fase I iterasi I

Dari hasil iterasi I, dilakukan pengontrolan kembali dengan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase I iterasi II dan ternyata masih terdapat pengamatan yang terdeteksi tidak terkendali, yaitu pengamatan 46 dan 68. Selanjutnya dilakukan iterasi III dan ternyata masih terdapat pengamatan yang terdeteksi tidak terkendali, yaitu pengamatan 30. Iterasi berikutnya, yaitu iterasi IV yang dapat dilihat pada Gambar 2 tidak ditemukan adanya pengamatan yang terdeteksi tidak terkendali dengan kata lain semua pengamatan sudah terkontrol.



Gambar 2 Diagram Kontrol D^2 Mahalanobis Fase I iterasi IV

Setelah keadaan pengamatan pada fase I telah terkontrol, diperoleh taksiran parameter. Nilai taksiran parameter yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Nilai Taksiran Parameter

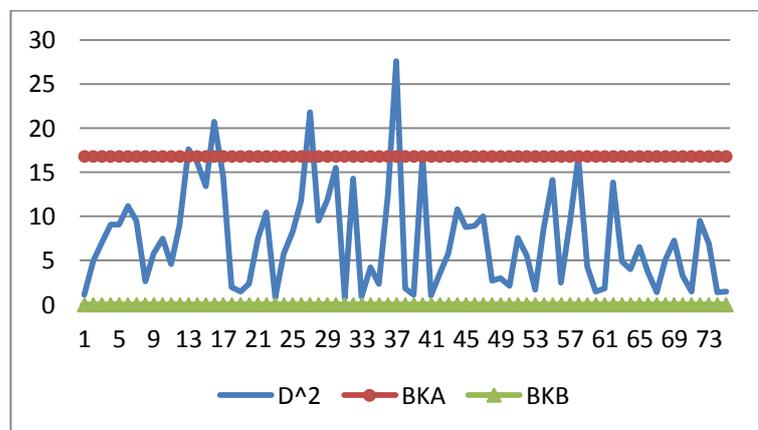
Taksiran Parameter	Nilai
\hat{p}_1	0.000159736
\hat{p}_2	0.000297812
\hat{p}_3	0.000111725
\hat{p}_4	0.000111003
\hat{p}_5	0.000086455
$1 - \sum_{i=1}^5 \hat{p}_i$	0.999233268

Tabel 2 menunjukkan taksiran parameter yang merupakan hasil rata-rata proporsi ketidaksesuaian pada masing-masing variabel. Rata-rata proporsi ketidaksesuaian terbesar yaitu pada variabel *Bottle Washer* (X_2). Hal ini dapat terjadi karena variabel *Bottle Washer* mempunyai jumlah ketidakterkendalian paling besar. Nilai taksiran parameter yang diperoleh pada penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase I tersebut, untuk selanjutnya digunakan dalam

perhitungan nilai jarak pada diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II. Sehingga pada penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II tidak perlu menghitung rata-rata proporsi kecacatan pada masing-masing variabel.

4.2 Penerapan Diagram Kontrol D^2 Mahalanobis Fase II

Data yang digunakan dalam penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II adalah data cacat produksi pada bulan Oktober 2012. Rata-rata proporsi untuk tiap variabel menggunakan nilai taksiran parameter yang telah diperoleh pada fase I. Dengan $\alpha = 0.01$ dan k adalah jumlah variabel yang digunakan yaitu enam, diperoleh nilai BKA pada diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II sebesar 16.812 dan BKB adalah 0. Dengan nilai BKA dan BKB tersebut, hasil penerapan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram Kontrol D^2 Mahalanobis Fase II

Tabel 3 Pengamatan tanda tidak terkendali Fase II

Pengamatan ke-	Nilai D^2	BKA
13	17.602367	16.812
16	20.732612	16.812
27	21.838177	16.812
37	27.624610	16.812
40	16.841376	16.812

Berdasarkan diagram kontrol D^2 Mahalanobis fase II, secara grafik terlihat bahwa beberapa pengamatan tidak terkendali karena memiliki nilai D^2 lebih besar dari BKA. Terdapat 5 pengamatan dari 75 pengamatan tidak terkendali atau 6.66% pengamatan tidak terkontrol. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas proses produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* (RGB) ukuran 295 ml di PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java belum stabil.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang diperoleh pada bab sebelumnya, dapat diambil kesimpulan bahwa dengan menggunakan diagram kontrol D^2 Mahalanobis, proses produksi minuman kemasan *returnable glass bottle* di PT. Coca-cola Bottling Indonesia Central Java menunjukkan hasil yang belum stabil dan belum terkendali. Hal ini dikarenakan pada fase II terdapat 5 pengamatan dari 75 pengamatan atau sebanyak 6.66% pengamatan yang terdeteksi belum terkendali atau di luar batas kendali.

DAFTAR PUSTAKA

- Anton, H. and Rorres, C., *Elementary Linear Algebra Applications Version* 11th edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2014.
- Buczynski, B., *Mourning The Death Of The Returnable Glass Coke Bottle*, 2012.
URL: <http://www.care2.com/causes/mourning-the-death-of-the-returnable-glass-coke-bottle.html> (diakses 19 November 2013).
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J. and Anderson, R. E., *Multivariate Data Analysis* 7th edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2010.
- Heizer, J. and Render, B., *Operations Management* 10th edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2010.
- Johnson, A.R. and Wichern, D. W., *Applied Multivariate Statistical Analysis* 6th edition, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2007.
- Mardia, K. V., Kent, J. T. and Bibby, J. M., *Multivariate Analysis* 10th edition, Academic Press, London, 1995.
- Montgomery, D. C., *Introduction to Statistical Quality Control* 6th edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2009.
- Mukhopadhyay, A.R., Multivariate Attribute Control Chart Using Mahalanobis D^2 Statistic. *Journal of Applied Statistics*, 2008, Vol. 35, No. 4, 421- 429.