

PENGHILANGAN NOISE PADA CITRA BERWARNA DENGAN METODE TOTAL VARIATION

Anny Yuniarti, Nanik Suciati, Fetty Tri A.

Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS, Jl. Raya ITS, Sukolilo – Surabaya 60111, Tel. + 62 31 5939214, Fax. + 62 31 5913804
Email : anny@its-sby.edu

ABSTRAK

Saat ini multimedia telah menjadi teknologi yang cukup dominan. Tukar menukar informasi dalam bentuk citra sudah banyak dilakukan oleh masyarakat. Citra dengan kualitas yang baik sangat diperlukan dalam penyajian informasi. Citra yang memiliki noise kurang baik digunakan sebagai sarana informasi, oleh karena itu diperlukan suatu metode untuk memperbaiki kualitas citra.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode total variation untuk penghilangan noise yang dapat diterapkan untuk model warna nonlinier, yaitu Chromaticity-Brightness (CB) dan Hue-Saturation-Value (HSV). Filter total variation disebut filter yang bergantung pada data citra karena koefisien filternya diperoleh dari pemrosesan data citra dengan rumusan yang baku. Sehingga filter mask untuk masing-masing piksel memiliki kombinasi koefisien yang berbeda. Metode ini menggunakan proses iterasi untuk menyelesaikan persamaan dasar yang nonlinier.

Uji coba dilakukan dengan menggunakan 30 data dengan berbagai jenis noise, yaitu gaussian, salt and pepper dan speckle. Uji coba perbandingan dengan metode filter median dan filter rata-rata. Dari percobaan ini menunjukkan bahwa metode total variation menghasilkan citra yang lebih baik daripada metode filter median maupun filter rata-rata, terutama pada citra yang terdegradasi dengan noise gaussian dan speckle.

Kata kunci : Denoising, Total variation, Nonlinear Color Model

1. PENDAHULUAN

Saat ini kebutuhan tukar menukar informasi dalam bentuk citra semakin hari semakin meningkat. Citra berkualitas rendah dapat mengurangi kenyamanan pengguna. Untuk itu digunakan suatu metode untuk mempertinggi kualitas citra, terutama pada citra yang mengandung noise.

Dalam penelitian ini diajukan penggunaan metode total variation untuk mempertinggi kualitas citra dengan cara menghilangkan noise yang ada pada citra tersebut. Total variation merupakan filter spasial yang bersifat lowpass. Perbedaan utama antara total variation dengan filter spasial yang lain adalah koefisien filter pada total variation diperoleh dari perhitungan dengan rumusan yang baku, dimana masukan dari pembuatan koefisien filter berasal dari data citra itu sendiri, oleh karena itu total variation disebut sebagai filter yang bergantung pada data. Pada umumnya proses penghilangan noise menggunakan model warna linier, yaitu RGB. Dalam penelitian ini akan dicoba menggunakan model warna nonlinier yang lebih dekat dengan perspektif manusia, yaitu Chromaticity-Brightness dan Hue-Saturation-Value.

2. PENGUBAHAN MODEL WARNA

Pada umumnya citra digital menggunakan model warna RGB. Model warna RGB memberikan data sederhana, yaitu berupa rangkaian warna merah, hijau dan biru untuk setiap titik piksel. Tiap piksel $p=(x, y)$ memiliki nilai vektor $I(p)=(u_1(p), u_2(p), u_3(p))$ yang

mewakili tiga warna primer merah, hijau dan biru secara berurutan.

Model warna CB terdiri dari 2 komponen warna, yaitu chromaticity dan brightness. Brightness merupakan komponen warna linier, sedangkan chromaticity adalah komponen warna nonlinier. Ruang warna chromaticity berbentuk bola, dimana nilainya berada di bagian bola dengan nilai positif. Brightness diperoleh dari panjang Euclidean vektor $u(p)=\|I(p)\|$, sedangkan chromaticity diperoleh dari $f(p)=I(p)/u(p)$. Nilai RGB dapat diperoleh kembali dengan cara mengalikan nilai chromaticity dengan nilai brightness.

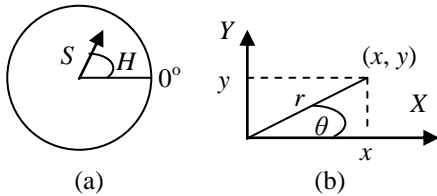
Model warna HSV terdiri dari 3 komponen warna, yaitu hue, saturation dan value. Saturation dan value merupakan komponen warna linier, sedangkan hue merupakan komponen warna nonlinier karena ruang warnanya berbentuk lingkaran. Algoritma pengubahan RGB menjadi HSV adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{nimaks} &= \text{MAX}(R, G, B) \\ \text{ni min} &= \text{MIN}(R, G, B) \\ \text{delta} &= \text{nimaks} - \text{ni min} \\ H &= \begin{cases} 60 \cdot (G - B) / \text{delta} / 360, & \text{jika } R = \text{nimaks} \\ 120 + 60 \cdot (B - R) / \text{delta} / 360, & \text{jika } G = \text{nimaks} \\ 240 + 60 \cdot (R - G) / \text{delta} / 360, & \text{jika } B = \text{nimaks} \end{cases} \\ S &= \frac{\text{nimaks} - \text{ni min}}{\text{nimaks}} \\ V &= \text{nimaks} \end{aligned}$$

Agar nilai hue lebih mendekati perspektif manusia, maka dilakukan proses transformasi lingkaran pada komponen warna hue dan saturation,

komponen warna gabungan ini disebut *HS-chromaticity* atau *Z*. Proses transformasi lingkaran merupakan pembentukan bilangan kompleks dari komponen warna *hue* dan *saturation*. Proses ini dapat dilakukan karena karakteristik hubungan nilai *hue* dan *saturation* mirip dengan konsep bilangan kompleks (lihat Gambar 1).

$$Z = S \times \exp(i \times 2 \times \pi \times H)$$



Gambar 1. (a) Penampang ruang warna HSV. (b) Bidang bilangan kompleks.

Pada akhirnya hanya 2 komponen warna dari model warna HSV yang akan diproses dengan *total variation*, yaitu *HS-chromaticity* dan *value*, dimana kedua komponen warna tersebut merupakan komponen warna linier. Dan 2 komponen dari model warna CB, yaitu *chromaticity* dan *brightness*.

3. METODE TOTAL VARIATION

Pada sebuah citra, tepi obyek dan *noise* merupakan komponen citra yang memiliki frekuensi yang tinggi. Tepi obyek merupakan komponen yang penting pada citra dan seharusnya tidak terdistorsi oleh proses pemfilteran, sedangkan *noise* merupakan komponen yang ingin dikurangi intensitasnya dengan proses pemfilteran. Oleh karena itu diperlukan suatu pendeteksian yang dapat membedakan tepi obyek dari *noise*. Metode *total variation* mampu melakukan pendeteksian kedua komponen tersebut sejalan dengan proses pembuatan filter. Metode *total variation* diciptakan oleh Rudin, Osher dan Fatemi yang pada awalnya didesain untuk sinyal analog dan kontinyu [1].

Sebuah citra pada umumnya didefinisikan dalam model warna RGB, dimana model warna ini berada pada ruang *Euclidean* (R^n). Sehingga sebuah citra memiliki fungsi $u : \Omega \rightarrow R^n$ (umumnya $n=1, 2$ atau 3). Misal $u^0(x, y)$ adalah data citra ber-*noise* dari data $u(x, y)$ yang diberi *noise* $n(x, y)$ dengan rata-rata 0 dan *variance* (σ^2) tertentu, maka:

$$u^0(x, y) = u(x, y) + n(x, y)$$

Fungsi *total variation* adalah sebagai berikut:

$$\min TV(u) \text{ dengan } \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} (u - u^0)^2 dx dy = \sigma^2$$

dimana $TV(u)$ merupakan bentuk L^1 dari rumus gradien L^2 :

$$TV(u) = \int_{\Omega} |\nabla u| dx dy$$

Sehingga fungsi *total variation* dalam bentuk diskrit:

$$TV(u, \lambda) = \sum_{\alpha \in \Omega} |\nabla_{\alpha} u| + \frac{\lambda}{2} \sum_{\alpha \in \Omega} (u_{\alpha} - u_{\alpha}^{(0)})^2 \quad (1)$$

dengan persamaan *Euler Lagrange*:

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) + \lambda(u - u^0) = 0$$

Variasi lokal $|\nabla u|$ diperoleh dari penghitungan jarak *Euclidean* antara 2 titik piksel. Pada citra, ada kemungkinan muncul nilai variasi lokal $|\nabla u|=0$ yang menyatakan bahwa daerah yang sedang diteliti memiliki nilai yang sama atau *flat*, untuk menghindarinya digunakan satu parameter yang disebut parameter regularisasi (a) yang ditambahkan dalam penghitungan $|\nabla u|$ (lihat persamaan (2)), nilai parameter a yang digunakan bernilai 10^{-4} [1].

$$|\nabla_{\alpha} u|_u = \sqrt{|\nabla_{\alpha} u|^2 + a^2} \quad (2)$$

Parameter kedua yang keberadaannya sangat penting adalah parameter *fitting* (λ). Parameter λ digunakan sebagai penyeimbang antara proses penghilangan *noise* dan *smoothing*. Jika diperhatikan pada persamaan (1), nilai λ menyatakan tingkat koefisien dari data masukan awal (data ber-*noise*). Semakin besar nilai λ semakin sedikit *noise* yang berkurang dan sebaliknya semakin kecil λ semakin banyak *noise* yang dapat dihilangkan. Nilai λ dapat dihitung dari:

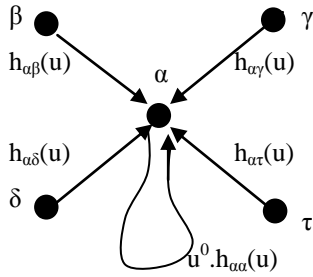
$$\lambda = \frac{1}{\sigma^2} \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\alpha \in \Omega} \sum_{\beta \in \Omega} w_{\alpha\beta} (u_{\beta} - u_{\alpha}) (u_{\alpha} - u_{\alpha}^0)$$

Pada iterasi pertama nilai λ dapat diperoleh hanya dengan $1/\sigma^2$ [1].

Fungsi *total variation* pada persamaan (1) bersifat global, untuk pemrosesan tiap piksel yang dibatasi dengan adanya filter *mask* digunakan metode *steepest descent* [5], sehingga perumusan *total variation* untuk tiap piksel diperoleh dari negatif gradien fungsi total energi:

$$\frac{df_{\alpha}}{dt} = -\nabla TV(u, \lambda) = \sum_{\beta \in N_{\alpha}} \left(\frac{1}{|\nabla_{\alpha} u|} + \frac{1}{|\nabla_{\beta} u|} \right) u_{\beta} + \lambda u_{\alpha}^{(0)} \quad (3)$$

Gambaran pemfilteran tiap piksel pada metode *total variation* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Filter digital *total variation* pada piksel α dan $\beta, \gamma, \delta, \tau$ adalah piksel tetangga pada $N_D(\alpha)$. Tiap panah menyatakan nilai u pada tiap piksel dikalikan dengan koefisien filter dan ditambahkan pada α .

Langkah-langkah pemfilteran untuk setiap piksel dalam domain citra terdiri dari beberapa tahapan berikut:

1. Hitung variasi lokal ($|\nabla u|$) pada tiap piksel untuk seluruh area citra.

$$|\nabla_\alpha u| = \left(\sum_{\beta \in N_\alpha} d_i^2(u_\beta, u_\alpha) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$d_i(u_\beta, u_\alpha) = u_\beta - u_\alpha$$

2. Hitung bobot (w) masing-masing piksel dengan piksel tetangga

$$w_{\alpha\beta}(u) = \frac{1}{|\nabla_\alpha u|} + \frac{1}{|\nabla_\beta u|} \quad (5)$$

3. Hitung koefisien filter (h)
Koefisien filter piksel tetangga :

$$h_{\alpha\beta}(u) = \frac{w_{\alpha\beta}(u)}{\lambda + \sum_{\gamma \sim \alpha} w_{\alpha\gamma}(u)}$$

Koefisien filter piksel yang di observasi :

$$h_{\alpha\alpha}(u) = \frac{\lambda}{\lambda + \sum_{\gamma \sim \alpha} w_{\alpha\gamma}(u)}$$

4. Pemfilteran

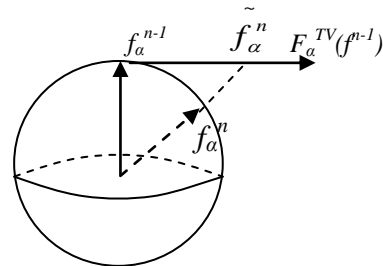
$$f_\alpha^n = \sum_{\beta \in N_\alpha} h_{\alpha\beta}^{n-1} u_\beta^{n-1} + h_{\alpha\alpha}^{n-1} u_\alpha^{(0)} \quad (6)$$

Proses *total variation* yang dikembangkan merupakan proses iterasi yang menggunakan konsep steepest descent sebagai pemecahan masalah optimisasi yang nonlinier. Iterasi berhenti jika selisih antara hasil iterasi n dan hasil iterasi $n-1$ lebih kecil dari epsilon. Nilai epsilon diperoleh dari percobaan pada banyak citra.

4. METODE TOTAL VARIATION PADA KOMPONEN WARNA NONLINIER

Penerapan metode *total variation* pada komponen warna linier dapat menggunakan perumusan di atas. Sedangkan *total variation* pada komponen warna nonlinier memerlukan proses tambahan untuk mengatasi sifat komponen warna masukan yang nonlinier. Dalam penelitian ini ada 2 komponen warna nonlinier, yaitu *chromaticity* dan *hue*. Telah dijelaskan pada bab sebelumnya, komponen warna *hue* telah diubah menjadi komponen warna linier dengan melakukan proses transformasi lingkaran pada komponen warna *hue* dan *saturation*. Sehingga hanya komponen warna *chromaticity* yang masih nonlinier.

Nilai *chromaticity* berada pada ruang berbentuk bola. Panjang vektor dari *chromaticity* harus sama yaitu 1, berapapun kombinasi nilai dalam vektor. Jika *chromaticity* diterapkan pada *total variation* skalar, hasil keluarannya tidak memiliki panjang vektor 1. Hal ini karena sifat TV skalar membentuk garis lurus keluar dari ruang warna *chromaticity* yang berbentuk bola (lihat Gambar 3). Agar nilai vektor berada dalam ruang bola, maka hasil keluaran TV skalar harus dibagi dengan panjang vektor tersebut (lihat persamaan (4)).



Gambar 3. Proyeksi TV skalar terhadap ruang warna *chromaticity*.

Gambar 3 mengilustrasikan penerapan TV skalar pada komponen warna *chromaticity* dan proyeksinya.

\tilde{f}_α^n adalah hasil *total variation* skalar, sedangkan f_α^n adalah hasil proyeksi TV skalar terhadap bidang bola.

$$f_\alpha^n = \frac{\tilde{f}_\alpha^n}{\left\| \tilde{f}_\alpha^n \right\|} \quad (7)$$

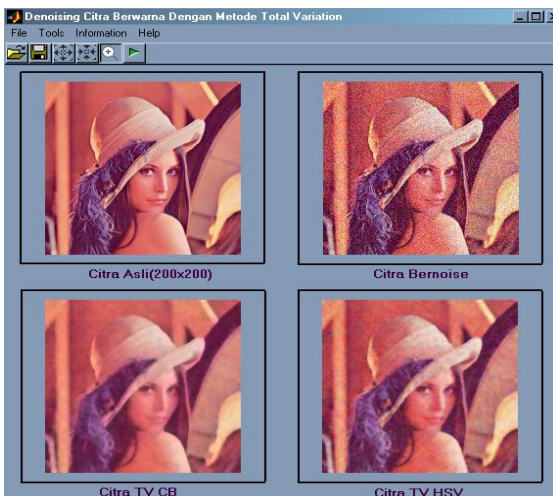
5. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT LUNAK

Pada tahap perancangan digunakan DAD (Diagram Aliran Data) untuk mengetahui proses-proses apa saja yang diperlukan. Perangkat lunak

yang dibuat berupa aplikasi desktop yang dibangun dengan MATLAB 6.5.1.

Data masukan berupa nama file citra dan jenis *noise* yang akan ditambahkan. Sedangkan keluaran terdiri dari 2 citra, yaitu citra hasil *total variation* pada model warna CB dan HSV.

Ada 3 tahap proses utama dalam implementasi metode *total variation* (TV) pada citra berwarna, yaitu praproses, proses penghilangan *noise* dan pascaproses. Praproses meliputi pengubahan model warna RGB menjadi model warna *chromaticity-brightness* (CB) dan *hue-saturation-value* (HSV). Proses transformasi lingkaran juga termasuk dalam tahapan ini.



Gambar 4. Antarmuka utama

Proses penghilangan *noise* adalah penerapan metode *total variation*. Proses penghilangan *noise* dapat dibagi dalam 2 tahapan, yaitu pembuatan koefisien filter dan pemfilteran piksel. Proses *total variation* dilakukan secara iteratif sampai mencapai kondisi konvergen.

Tahapan terakhir yang harus dilalui adalah pascaproses. Pascaproses adalah tahapan proses yang mengolah keluaran dari *total variation* untuk dapat ditampilkan kepada pengguna. Ada satu proses

penambahan yang bersifat pilihan, yaitu penambahan *noise*. Proses ini disediakan untuk mengakomodasi kemungkinan kondisi citra masukan tidak ber-*noise*.

Rancangan antarmuka secara umum terbagi ke dalam 3 bagian, yaitu antarmuka utama, antarmuka masukan parameter dan antarmuka informasi. Gambar 4 menampilkan antarmuka utama.

6. UJI COBA

Telah dilakukan uji coba untuk keperluan pengukuran kinerja dari perangkat lunak. Pada bagian ini akan dilaporkan beberapa hasil dari uji coba. Citra yang digunakan dalam penghilangan *noise* berformat bitmap dan tidak terbatas pada citra natural. Pengukuran kualitas data keluaran dilakukan dengan menggunakan RMS (*root-mean-square*) dan SNR (*signal-to-noise ratio*). Ujicoba dilakukan pada sembarang 30 citra berwarna dan tidak terbatas pada citra natural. Dari 30 citra tersebut diberi 3 jenis *noise*. Jenis *noise* yang digunakan adalah *gaussian*, *salt and pepper* dan *speckle*. *Noise gaussian*, menggunakan rata-rata 0 dan *variance* 0,01. *Salt and pepper*, menggunakan *variance* 0,04. *Speckle* menggunakan parameter kepadatan 0,05.

Pada ujicoba pertama dilakukan pengujian metode *total variation* terhadap variasi *noise*. Uji coba ini bertujuan untuk mengetahui jenis *noise* yang dapat dengan baik dihilangkan dengan metode *total variation*. Berdasarkan hasil uji coba pada Tabel 1 didapatkan hasil bahwa pada model warna CB metode *total variation* dapat bekerja dengan baik untuk jenis *noise gaussian*, begitu juga pada model warna HSV, hal ini ditunjukkan dengan nilai SNR untuk citra keluaran penerapan *total variation* dari citra yang terdegradasi dengan *noise gaussian* lebih besar daripada dua *noise* yang lain. Prosentase tingkat keberhasilan penghilangan *noise* pada CB 80,37% dan HSV 76,43%. Tingkat keberhasilan tidak dapat digunakan sebagai dasar pengambilan kesimpulan karena tidak merepresentasikan penilaian secara subyektif atau visual.

Tabel 1. Tabel rata-rata SNR dan tingkat keberhasilan uji coba *total variation* dengan variasi jenis *noise*

Noise	<i>Chromaticity-Brightness</i>		<i>Hue-Saturation-Value</i>	
	SNR	Tingkat keberhasilan	SNR	Tingkat keberhasilan
<i>Gaussian</i>	108,78	80,37%	98,0955	76,43%
<i>Salt & Peppers</i>	106,1696	81,19%	70,9801	79,96%
<i>Speckle</i>	89,1631	68,4%	82,5541	73,71%

Uji coba kedua bertujuan untuk membandingkan kualitas citra keluaran metode *total variation* dengan metode penghilangan *noise* yang lain. Metode perbandingan yang digunakan adalah filter *median* dan filter rata-rata. Berdasarkan Tabel 2 menunjukkan filter *median* bekerja lebih baik daripada *total*

variation pada kedua model warna CB dan HSV, yang ditunjang dengan nilai SNR dan tingkat keberhasilan pada filter *median* lebih baik daripada dua metode yang lain. Tabel 3 menunjukkan *total variation* bekerja paling baik daripada dua metode yang lain, baik pada model warna CB dan HSV. Hal

ini ditunjang dengan nilai SNR dan tingkat keberhasilan pada *total variation* lebih baik daripada dua metode yang lain. Tabel 4 menunjukkan *total variation* bekerja paling baik daripada dua metode yang lain, baik pada model warna CB dan HSV. Hal ini ditunjukkan dengan nilai SNR untuk kedua model warna pada *total variation* lebih baik daripada dua metode yang lain. Berdasarkan seluruh uji coba perbandingan metode penghilangan *noise* yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa metode

total variation menghasilkan citra keluaran yang lebih baik jika dibandingkan dengan filter *median* dan filter rata-rata. Prosentase tingkat keberhasilan penghilangan *noise* dengan metode *total variation* untuk seluruh data citra dan berbagai jenis *noise* adalah 76,68%, sedangkan filter *median* 74,12% dan filter rata-rata 70,01%. Pada Gambar 5 tampak hasil penghilangan *noise* dengan berbagai metode pada citra lena.bmp.



Gambar 5. Uji coba perbandingan metode penghilangan *noise*. (a) Citra asli. (b) Citra ber-*noise*. Metode *total variation* (c-d), filter *median* (e-f) dan filter rata-rata (g-h). Kolom kiri, penerapan metode penghilangan *noise* pada model warna CB dan kolom kanan pada model warna HSV.

Tabel 2. Tabel rata-rata SNR dan tingkat keberhasilan uji coba dengan variasi metode penghilangan *noise* untuk citra yang terdegradasi dengan *noise salt and pepper*

Metode	<i>Chromaticity-Brightness</i>		<i>Hue-Saturation-Value</i>	
	SNR	Tingkat keberhasilan	SNR	Tingkat keberhasilan
<i>Total variation</i>	106,1696	81,19%	70,9801	79,96%
Filter <i>Median</i>	187,8396	87,58%	131,4412	87,22%
Filter Rata-rata	50,6416	71,51%	39,6309	65,23%

Tabel 3. Tabel rata-rata SNR dan tingkat keberhasilan uji coba dengan variasi metode penghilangan *noise* untuk citra yang terdegradasi dengan *Gaussian*

Metode	<i>Chromaticity-Brightness</i>		<i>Hue-Saturation-Value</i>	
	SNR	Tingkat keberhasilan	SNR	Tingkat keberhasilan
<i>Total variation</i>	108,78	80,37%	98,0955	76,43%

Filter <i>Median</i>	79,3794	79,8%	43,704	63,81%
Filter Rata-rata	60,5994	76,62%	52,2054	71,49%

Tabel 4. Tabel rata-rata SNR dan tingkat keberhasilan uji coba dengan variasi metode penghilangan noise untuk citra yang terdegradasi dengan noise speckle

Metode	<i>Chromaticity-Brightness</i>		<i>Hue-Saturation-Value</i>	
	SNR	Tingkat keberhasilan	SNR	Tingkat keberhasilan
<i>Total variation</i>	89,1631	68,4%	82,5541	73,71%
Filter <i>Median</i>	56,6015	68,65%	25,7255	57,63%
Filter Rata-rata	53,6152	66,95%	51,9155	68,25%

7. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari aplikasi yang telah dibuat dan berdasarkan uji coba yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Setiap komponen warna memiliki nilai epsilon masing-masing, yaitu 0,0005 untuk *chromaticity*, 0,1 untuk *brightness*, 0,1 untuk *value*, dan 0,1 untuk *HS-Chromaticity*.
2. Proses transformasi lingkaran pada model warna *Hue-Saturation-Value* sangat mempengaruhi kualitas citra keluaran dari proses penghilangan noise. Pengolahan fitur *hue* dan *saturation* secara langsung memberikan citra keluaran yang kurang baik dan menimbulkan penyimpangan dari warna asli.
3. Penggabungan hasil penerapan *total variation* pada fitur *chromaticity* dan *brightness* menghasilkan citra keluaran yang lebih baik daripada penerapan *total variation* hanya pada *chromaticity*.
4. Metode *total variation* bekerja dengan sangat baik untuk citra yang terdegradasi *noise gaussian*, baik pada model warna *Chromaticity-Brightness* maupun *Hue-Saturation-Value*, dengan tingkat keberhasilan pada CB 80,37% dan HSV 76,43%.
5. Metode *total variation* mampu menghilangkan noise lebih baik daripada metode filter *median* dan filter rata-rata, baik pada model warna *Chromaticity-Brightness* maupun *Hue-Saturation-Value*, dengan prosentase keberhasilan pada TV 76,68%, filter median 74,12% dan filter rata-rata 70,01%.

Berikut ini adalah saran untuk kemungkinan pengembangan lebih lanjut dari pembuatan aplikasi penghilangan noise dengan metode *total variation*:

1. Disarankan untuk mengembangkan aplikasi ini untuk mengatasi efek staircasing yang muncul akibat penghilangan noise dengan metode *total variation*.
2. Disarankan untuk mencoba metode *total variation* dengan perumusan persamaan difusi yang berbeda (selain metode *steepest descent*) untuk memperoleh kecepatan lebih tinggi, misal *Fixed Point Lagged Diffusivity* dan metode *Primal Dual*.

8. DAFTAR PUSTAKA

1. Chan, T.F.; Kang, S.H.; Shen, J. "Total variation Denoising and Enhancement of Color Images Based on the CB and HSV Color". Technical report, UCLA Dept. of Math, CAM 00-25, 2000.
2. Chan, T.F.; Osher, S.; Shen, J. "The digital TV filter and nonlinier denoising". IEEE Trans. Image Processing, to appear, 2000.
3. Chan, T.F.; Shen, J. "Variational restoration of non-flat image features : Models and algorithms". SIAM Journal of Applied Mathematics, to appear, 2000.
4. Gonzales, R; Woods, R. "Digital Image Processing Second Edition". Prentice Hall, 2002.
5. Venkataraman P. "Applied Optimization With MATLAB Programming". John Wiley & Sons, 2002.