

ANALISIS PERFORMANSI KOMPRESI WAVELET DAN KOMPRESI SLANTLET PADA DATA CITRA BINER, GRAYSCALE DAN RGB BERFORMAT BMP, PNG DAN JPEG

Analysis Performance Wavelet Compression and Slantlet Compression in Binary, Grayscale and RGB Image with BMP, PNG and JPEG Format

Aulia Wibowo¹, Gelar Budiman, ST., MT², Ledy Novamizanti, ST., MT³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

¹auliawibowo12@gmail.com, ²gelarbudiman@telkomuniversity.com, ³ledvaman@gmail.ac.id

Abstrak

Kompresi adalah suatu teknik pemampatan data agar suatu data memiliki ukuran yang lebih kecil dari ukuranaslunya. Pada zaman sekarang ini dengan majunya teknologi internet dan kebiasaan masyarakat modern yang semakin sering melakukan download atau upload data ke internet baik itu ke media sosial atau pun keperluan pribadi menjadikan teknik kompresi mejadi suatu keharusan pada setiap aplikasi dan teknologi. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis mengenai dua teknik kompresi yaitu teknik kompresi *Wavelet* yang sudah banyak dikenal dengan kompresi *Slantlet* yang masih sangat awam tetapi memiliki kemampuan yang baik dalam hal kompresi citra. Dalam pengujian kali ini yang menjadi parameter pembandingnya adalah PSNR, MSE, rasio kompresi, dan waktu proses. Berdasarkan hasil analisis dan uji coba pada beberapa citra, didapatkan metode *Slantlet* memiliki nilai rata-rata PSNR 35.67 dB dan 34.62 dB untuk *Wavelet*. Nilai rasio kompresi *Slantlet* dan *Wavelet* hampir sama yang berarti kedua teknik tersebut memiliki kemampuan rata-rata kompresi yang hampir sama yaitu berkisar antara 45% - 95%. Waktu proses rata-rata *Slantlet* lebih cepat dibanding *Wavelet* yaitu 182 detik untuk *Slantlet* dan 217 untuk *Wavelet*.

Kata kunci : Kompresi Citra, *Wavelet*, *Slantlet*, SPIHT

Abstract

Compression is a technique downsizing of the data so that the data has a size smaller than its original size. At the time of this have now with the advent of internet technology and habits of modern society is increasingly frequent to download or upload data to the internet either to social media or personal use compression techniques to make becoming a necessity in every application and technology In this final project will be an analysis of the two compression techniques that Wavelet compression technique is already widely known and Slantlet compression who are common but have good ability in terms of image compression. In this time of testing the parameters of the comparison is PSNR, MSE, compression ratio, and processing time. Based on the analysis and testing on multiple images, obtained Slantlet method has an average PSNR value of 35.67dB and 34.62 dB for Wavelet. Value Slantlet and Wavelet compression ratio is almost the same, which means these two techniques memiliki average ability is almost the same, compression ranged between 45% - 95%. Average processing time is faster Slantlet dibanding Wavelet ie 182 seconds to Slantlet and 217 seconds for Wavelet.

Keywords: Image Compression, *Slantlet*, *Wavelet*, SPIHT

1. Pendahuluan

Kompresi adalah suatu teknik pemampatan data agar suatu data memiliki ukuran yang lebih kecil dari ukuran aslinya. Pada zaman sekarang ini dengan majunya teknologi internet dan kebiasaan masyarakat modern yang semakin sering melakukan download atau upload data ke internet baik itu ke media sosial atau pun keperluan pribadi menjadikan teknik kompresi mejadi suatu keharusan pada setiap aplikasi dan teknologi. Pesatnya pertukaran data tersebut menimbulkan masalah jika tidak diimbangi dengan suatu teknologi yang dapat mengirim data dengan efisien agar tidak memenuhi suatu jaringan. Oleh karena itu selain dikembangkan cara berkomunikasi juga dikembangkan teknik kompresi data yang berfungsi untuk membuat suatu data menjadi lebih efisien untuk dikirimkan melalui suatu jaringan. Kompresi data ini sangat dibutuhkan karena pada data multimedia seperti gambar, video dan audio memiliki kapasitas yang sangat besar. Jika kita ingin mengimbuahkan suatu citra, audio atau video di suatu website tanpa adanya kompresi akan menyebabkan website tersebut menjadi tidak baik. Dan apa bila kita ingin menyimpan suatu gambar, audio atau video di penyimpanan ponsel kita tanpa adanya kompresi akan mengakibatkan celat penuhnya penyimpanan ponsel kita. Sebagai contoh 1 detik video tanpa

kompresi berformat CCIR 601 akan menghabiskan 20MB pada penyimpanan kita. Oleh karena itu dibutuhkan kompresi data.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis mengenai dua teknik kompresi yaitu teknik kompresi *Wavelet* yang sudah banyak dikenal dengan kompresi *Slantlet* yang masih sangat awam tetapi memiliki kemampuan yang baik dalam hal kompresi citra. Pada penelitian sebelumnya metode *Wavelet* sudah sangat banyak digunakan untuk pengolahan citra sedangkan *Slantlet* masih sangat yang mengujinya untuk digunakan dalam pengolahan sinyal ada beberapa peneliti yang menggunakan metode ini sebagai pre-processing dan sebagai transformasi.

2. Landasan Teori dan Perancangan Sistem

Sistem menggunakan transformasi *Slantlet* dan *Wavelet* untuk dekomposisi citra dan kemudian akan dilakukan proses coding dengan menggunakan algoritma SPIHT. Setelah dilakukan kompresi kemudian performansi dari kedua teknik akan di bandingkan dengan parameter PSNR, MSE, rasio kompresi dan waktu proses.

A. Wavelet

Sekitar tahun 1980 pertama kali ditemukannya transformasi *Wavelets*, dimana transformasi *Wavelet* ini digunakan sebagai alternatif pengganti Short Time Fourier Transform untuk analisa sinyal. *Wavelet* adalah “gelombang singkat” dengan energi terpusat pada saat tertentu. *Wavelet* telah dipakai dalam analisa sinyal kawasan waktu-frekuensi dalam pemrosesan sinyal, aproksimasi fungsi, aproksimasi dalam penyelesaian persamaan diferensial parsial dan sebagainya. Salah satu kegunaan dari *Wavelet* yaitu dapat digunakan untuk kompresi citra [1].

Transformasi *Wavelet* dilakukan dengan menerapkan filter high pass dan filter low pass dua dimensi untuk menghasilkan sub citra beresolusi rendah yang berukuran seperempat ukuran semula, dan tiga buah sub citra yang mewakili koefisien detail yang juga berukuran seperempat dari ukuran semula [2].

B. Slantlet

Slantlet adalah perkembangan dari transformasi *Wavelet* diskrit (DWT) yang memiliki filter bank yang orthogonal. *Slantlet* (SLT) mempunyai waktu lokalisasi yang lebih baik dari DWT karena dukungan komponen filter yang lebih pendek. *Slantlet* dapat digunakan sebagai pre processing pengolahan citra, kompresi, dan menghilangkan noise pada citra [3].

Pada *Slantlet* bentuk filterbank lebih sederhana karena tidak menggunakan konsep pohon seperti pada DWT. Filterbank pada *Slantlet* menggunakan konsep proses paralel yang langsung memproses filter bersamaan. Berikut perbandingan filter bank pada *Slantlet* dan DWT [4].

Karakteristik dari filterbank *Slantlet* adalah [3] :

1. Setiap filterbank *Slantlet* adalah othogonal
2. Setiap filterbank *Slantlet* memiliki dua zero moment
3. Setiap filterbank *Slantlet* memiliki karakteristik octave-band.

C. SPIHT

Algoritma kompresi SPIHT merupakan salah satu algoritma yang mengkodekan koefisien hasil transformasi *Wavelet* secara bertahap. Algoritma kompresi SPIHT bekerja dengan cara mengolah kesamaan turunan antar subband dalam dekomposisi *Wavelet* pada citra.

Alogoritma SPITH (Set Partitioning in Hierarchical Trees) adalah Metode SPIHT merupakan metode dari perbaikan dari algoritma pengkodean EZW (Embedded Zero *Wavelet*) yang dipresentasikan oleh J. Shapiro (Shapiro,1993). SPIHT pertama kali dipresentasikan oleh Said dan Pearlman. SPIHT mengasumsikan bahwa struktur dekomposisi adalah struktur bidang dan berdasarkan fakta sub-bidang pada level yang berbeda tetapi pada orientasi yang sama, akan memiliki karakteristik yang mirip.

SPIHT terdiri atas dua tahap, yaitu tahap pensortiran (sorting pass) dan tahap penghalusan (refinement pass). Pada tahap penyortiran SPIHT berusaha untuk mengurutkan koefisien berdasarkan besarnya, kemudian dalam tahap penghalusan kuantisasi koefisien diperhalus. Kedua tahap tersebut didasarkan atas nilai ambang tertentu. Nilai ambang pertama kali ditentukan atas kriteria tertentu, kemudian dilanjutkan dengan nilai ambang yang semakin kecil.

D. Parameter Pengujian

1. PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)

Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) adalah perbandingan antara nilai maksimum dari sinyal yang diukur dengan besarnya derau yang berpengaruh pada sinyal tersebut. PSNR biasanya diukur dalam satuan desibel. Pada tugas akhir kali ini, PSNR digunakan untuk mengetahui perbandingan kualitas citra sebelum dan sesudah dikompresi. Untuk menentukan PSNR, terlebih dahulu harus ditentukan nilai rata-rata kuadrat dari error (MSE - Mean Square Error) [1]. Perhitungan MSE adalah sebagai berikut :

$$MSE = \frac{1}{m \cdot n} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|I(i,j) - K(i,j)\|^2 \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

MSE	= Nilai Mean Square Error dari citra
m	= panjang citra dalam pixel
n	= lebar citra dalam pixel
(i,j)	= koodinat masing masing pixel
I	= nilai bit citra pada koordinat i,j
K	= nilai derajat keabuan citra pada koordinat i,j

$$PSNR = 10 \cdot \log \left(\frac{MAXI^2}{MSE} \right) = 20 \cdot \log \left(\sqrt{\frac{MAXI^2}{MSE}} \right) \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

PSNR	= nilai PSNR citra dalam db
MAXI	= nilai maksimum pixel
MSE	= nilai MSE

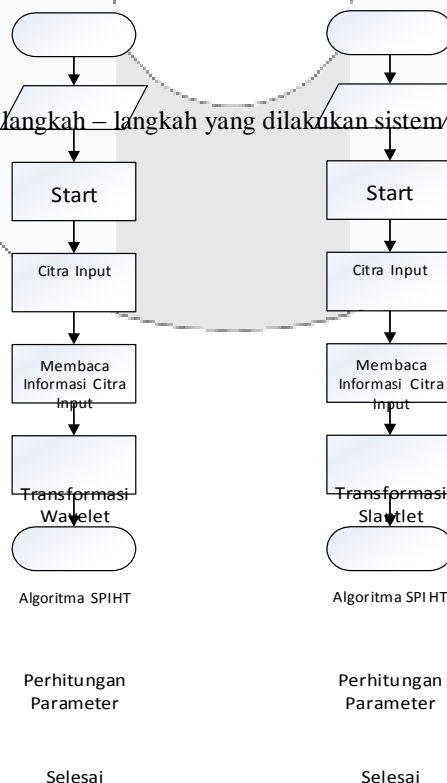
2. Rasio Kompresi

Rasio kompresi adalah suatu nilai yang biasanya digunakan untuk menilai kehandalan suatu kompresi. Adapun formula dari ratio kompresi adalah

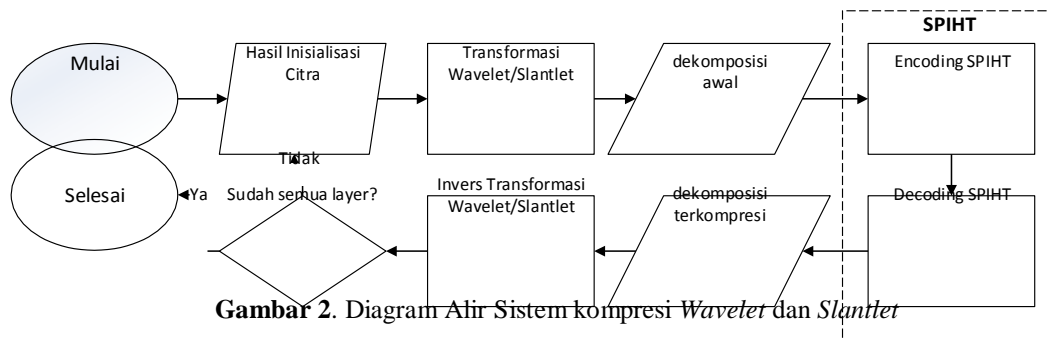
$$\frac{K}{K_{kompresi}} = \frac{K_{kompresi}}{K} \times 100\% \dots \dots (2.3)$$

E. Blok Diagram Sistem

Pada Gambar 1 digambarkan langkah – langkah yang dilakukan sistem agar dapat mengkompresi citra yang masuk.



Gambar 1. Diagram Alir Umum Sistem kompresi *Wavelet* dan *Slantlet*



Gambar 2. Diagram Alir Sistem kompresi *Wavelet* dan *Slantlet*

Setelah citra dimasukkan, proses yang dilakukan adalah menginisialisasi citra masukan tersebut untuk mendapatkan informasi informasi yang terkandung didalam citra tersebut. Informasi yang didapat dari proses inisialisasi ini adalah detail nilai per pixel, ukuran citra, dan banyaknya layer pada citra tersebut. Setelah inisialisasi proses selanjutnya adalah transformasi. Pada proses transformasi ini citra akan diubah menjadi citra dekomposisi yang membuat citra tersebut menjadi berada pada domain *Wavelet*.

Tahap selanjutnya adalah citra hasil dekomposisi tersebut akan dilakukan coding dengan algoritma SPIHT. Proses inilah yang membuat kompresi lossy pada sistem ini. Pada awal proses coding SPIHT ini dilakukan encoding untuk mengubah nilai pixel menjadi bit bit biner 1 dan 0. Kemudian setelah proses itu dilakukan akan dilakukan proses decoding yang bertujuan mengembalikan bit bit hasil encoding tadi menjadi citra dekomposisi sebelumnya, namun citra hasil decoding ini sudah berbeda dengan citra hasil dekomposisi awal karena sifat SPIHT yang lossy.

Setelah citra dibalikkan menjadi citra dekomposisi maka selanjutnya citra tersebut akan diinvers menjadi citra awal yang sudah terkompresi. Citra hasil kompresi ini akan memiliki ukuran data yang lebih kecil dari citra asli tetapi tentu saja dengan penurunan kualitas dari citra aslinya. Setelah citra berhasil dikompresi akan dilakukan penghitungan parameter performansi untuk perbandingan antara dua teknik kompresi yang diujikan.

F. Skenario Pengujian

Untuk mengetahui performansi dari sistem maka diperlukan tahap pengujian. Dalam pengujian ini akan dilakukan dua tahap, yang pertama yaitu menguji performansi kompresi *Wavelet* dan menguji performansi kompresi *Slantlet*. Setelah didapat data dari keduanya akan dilakukan perbandingan dan analisis. Parameter performansi yang digunakan dalam penujian ini adalah PSNR, MSE, rasio kompresi dan waktu proses. Dari hasil tersebut juga nantinya akan diambil kesimpulan terkait faktor yang mempengaruhi [performansi kompresi dan keterkaitan antara satu parameter dengan parameter lainnya.

3. Pembahasan

Pada pembahasan ini akan dibagi menjadi dua bagian sesuai dengan skenario pengujian, yaitu parameter performansi dan faktor pengaruh performansi kompresi.

A. Parameter Performansi

Dari pengujian yang dilakukan, didapat nilai parameter performansi sebagai berikut.

Tabel 1 Perbandingan Nilai MSE dan PSNR pada *Wavelet* dan *Slantlet*

Nama File	MSE		PSNR(dB)	
	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>
airplane.bmp	17.639194	13.79703	35.66602	36.73295
pikachu.bmp	34.507163	31.06691	32.75171	33.20782
suster.bmp	3.7701508	2.232592	42.36722	44.64271
dandelion.bmp	168.95233	145.7293	25.85316	26.49534
tel-u.bmp	14.663152	12.12254	36.46853	37.29487

Pada tabel hasil diatas dapat kita simpulkan beberapa hal yaitu kompresi dengan *Slantlet* memiliki nilai PSNR dan MSE yang lebih baik dibandingkan *Wavelet*. Ini berarti kualitas citra hasil kompresi *Slantlet* lebih mendekati gambar aslinya dari pada kompresi *Wavelet* karena jika nilai pSNR lebih besar maka citra tersebut akan lebih mirip dengan cirta aslinya atau dengan kata lain lebih baik disbanding dengan nilai PSNR yang lbih kecil. *Slantlet*

mampu memiliki nilai PSNR yang lebih baik karena sifat filterbank *Slantlet* yang memiliki dua zero moment sehingga gambar yang dihasilkan akan lebih halus.

Tabel 2 Perbandingan nilai rasio kompresi pada *Wavelet* dan *Slantlet*

Nama File	Rasio Kompresi (%)	
	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>
airplane.bmp	95.530117	95.53813
pikachu.bmp	96.660970	96.66428
suster.bmp	97.102173	97.13498
dandelion.bmp	91.812568	91.90742
tel-u.bmp	95.934320	95.90215

Dari tabel diatas dapat kita simpulkan juga bahwa teknik kompresi *Wavelet* dan *Slantlet* memiliki nilai rasio kompresi yang hampir sama di ketiga kasus diatas. Hal ini membuktikan bahwa kedua teknik ini memiliki kemampuan kompresi yang hampir sama walaupun tidak sama persis tetap perbedaan antar kedua sangat kecil sehingga tidak dapat disimpulkan bahwa salah satu teknik kompresi yang lebih baik dari yang lainnya.

Tabel 3 Perbandingan nilai rasio kompresi pada *Wavelet* dan *Slantlet*

Nama File	Waktu Proses (s)	
	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>
airplane.bmp	198.7572	190.8872
pikachu.bmp	146.2119	87.80494
suster.bmp	321.3559	317.0548
dandelion.bmp	274.2614	210.7106
tel-u.bmp	311.7518	287.6332

Slantlet memiliki waktu proses yang lebih cepat dari *Wavelet* hal ini dapat dilihat dari tabel hasil diatas. Hal ini disebabkan oleh sifat filterbank *Slantlet* yang lebih pendek dari *Wavelet*. Hal ini membuat *Slantlet* mampu melakukan proses kompresi lebih cepat.

Dari ketiga kasus diatas *Slantlet* lebih unggul pada PSNR dan waktu kompresi sedangkan pada rasio kompresi kedua teknik ini menunjukkan hasil yang hampir sama sehingga tidak dapat ditentukan keunggulan salah satu teknik. Selain itu pada tabel pengujian diatas juga dapat diambil kesimpulan bahwa ketiga parameter ini saling berkaitan dengan kata lain ketika salah satu nilai parameter baik maka nilai yang lainnya juga akan baik contohnya jika suatu citra memiliki nilai rasio kompresi yang baik maka citra tersebut akan memiliki nilai PSNR dan waktu kompresi yang baik juga.

B. Analisis Pengaruh Jenis Citra

Tabel 4 Performansi kompresi pada citra RGB

Nama File	PSNR(dB)		Rasio kompresi (%)		Waktu proses(dtk)	
	<i>Wavelet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>
airplane.bmp	35.666	36.732	95.530	95.538	198.7572	190.8872
pikachu.bmp	32.751	33.207	96.660	96.664	146.212	87.80494
suster.bmp	42.367	44.642	97.102	97.134	145.1525	105.2854
dandelion.bmp	25.853	26.495	91.812	91.907	321.356	317.0548
tel-u.bmp	36.468	37.294	95.934	95.902	274.2614	210.7106

Tabel 5 Performansi kompresi pada citra RGB

Nama File	PSNR(dB)		Rasio Kompresi (%)		Waktu proses (dtk)	
	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>
airplane.bmp	37.43	38.72	88.158	87.703	83.25926	56.48843
tel-u.bmp	39.1	40.13	88.846	88.994	50.63663	42.40372
suster.bmp	46.36	49.49	92.502	92.631	70.56693	62.40705
dandelion.bmp	27.54	28.22	76.893	77.734	107.7275	77.90417
pikachu.bmp	45.09	47.26	92.141	92.253	31.35915	30.50801

Tabel 6 Performansi kompresi pada citra biner

Nama File	PSNR(dB)		Rasio Kompresi (%)		Waktu proses (dtk)	
	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>	<i>Wavelet</i>	<i>Slantlet</i>
airplane.bmp	-	-	0	0	80.94832	67.97832
tel-u.bmp	-	-	0	0	48.32651	37.39070
suster.bmp	-	-	0	0	74.32135	54.32135
dandelion.bmp	-	-	0	0	112.31250	79.31434
pikachu.bmp	-	-	0	0	29.51339	30.28324

Dari tiga tabel hasil pengujian diatas dapat dilihat bahwa PSNR untuk citra jenis grayscale lebih baik dibanding citra RGB hal ini karena pada citra grayscale layer yang diproses hanya satu sehingga error piksel yang terjadi lebih sedikit dibandingkan dengan RGB yang memiliki tiga layer.

Nilai Rasio kompresi yang ditunjukkan RGB lebih baik jika dibandingkan dengan grayscale. Hal ini berkaitan dengan analisis sebelumnya terkait dengan PSNR yang dihasilkan oleh citra jenis RGB lebih kecil dibanding citra jenis grayscale sehingga citra jenis RGB mampu dikompresi menjadi lebih kecil dibanding grayscale. Dari sifat dan karakteristik algoritma SPIHT juga menyebutkan bahwa SPIHT mampu mengkompresi lebih baik untuk citra RGB.

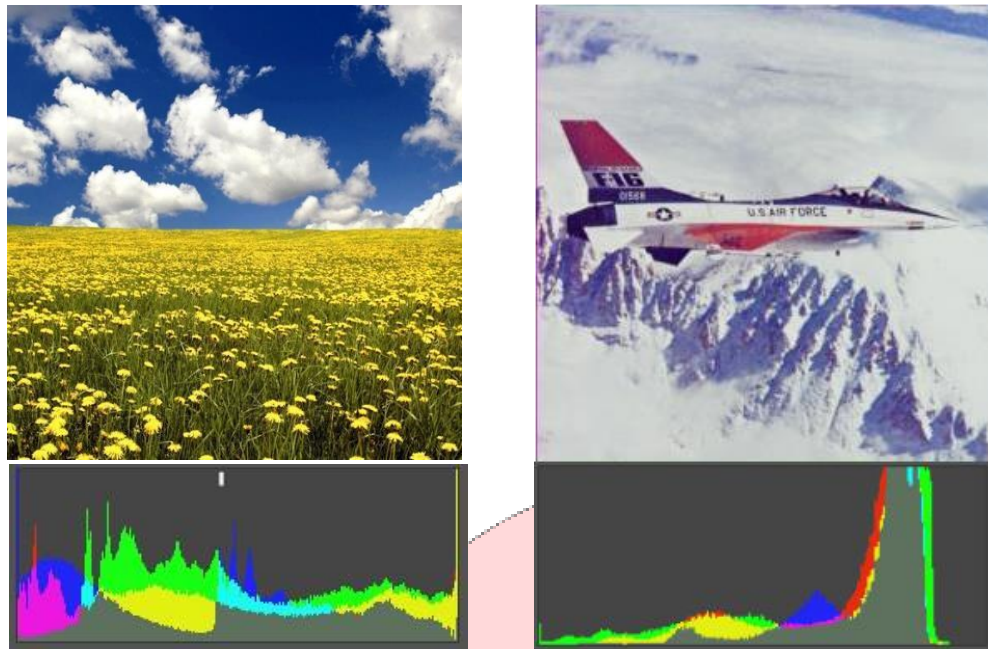
Untuk perbandingan waktu proses, citra jenis grayscale memiliki waktu proses lebih singkat dibanding RGB hal ini karena citra grayscale hanya memiliki satu layer sedangkan RGB memiliki tiga layer sehingga proses pengulangan pada citra grayscale lebih sedikit dan menghasilkan waktu proses yang lebih singkat.

Perbandingan performansi antara teknik kompresi *Wavelet* dan *Slantlet* pada jenis citra grayscale ini juga menunjukkan hasil yang sama yaitu teknik kompresi *Slantlet* memiliki keunggulan pada PSNR dan waktu proses yang lebih baik seperti pada analisis subbab sebelumnya.

Pada citra jenis biner tidak menghasilkan nilai PSNR dan juga rasio kompresi. Hal ini disebabkan oleh citra biner memiliki nilai pixel 1 atau 0 sehingga menyebabkan citra ini tidak mengalami kompresi sama sekali pada kedua teknik kompresi ini.

C. Faktor pengaruh performansi kompresi

Dari tabel hasil pengujian pada subbab sebelumnya dapat dilihat bahwa nilai performansi kompresi setiap citra berbeda beda hal ini disebabkan oleh faktor variasi warna pada citra tersebut. Berikut adalah gambar perbandingan histogram antara citra dengan variasi warna yang berbeda.



Gambar 3 Perbandingan histogram gambar dandelion.bmp (kiri) dengan airplane.bmp (kanan)

Jika kita lihat dari gambar 3 diatas dan pada table hasil perhitungan performansi pada subbab sebelumnya maka pernyataan yang menyebutkan bahwa variasi warna citra adalah salah satu faktor yang mempengaruhi performansi kompresi pada citra. Pada data tabel diatas menunjukkan hasil bahwa citra airplane memiliki performansi kompresi yang lebih baik dibandingkan dengan citra dandelion karena pada gambar histogram tersebut dapat dilihat variasi warna atau sebaran warna pada dandelion lebih beragam atau lebih kompleks.

4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis simulasi, dihasilkan beberapa kesimpulan yaitu Kualitas citra hasil kompresi *Slantlet* lebih baik dibandingkan *Wavelet* dengan nilai PSNR rata rata 35.6747 dB untuk *Slantlet* dan 34.6213 dB untuk *Wavelet*. Nilai rasio kompresi *Slantlet* dan *Wavelet* hampir sama yang berarti kedua teknik tersebut memiliki kemampuan kompresi yang hampir sama yaitu 85-97%. Waktu proses *Slantlet* lebih cepat dibanding *Wavelet*. *Slantlet* memiliki waktu proses rata rata 182.3485 untuk *Slantlet* dan 217.1478 untuk *Wavelet*. Faktor yang mempengaruhi performansi kompresi adalah kerumitan suatu citra atau variasi warna suatu citra.

Daftar Pustaka:

- [1] D. Salomon, G.Motta dan D.Bryant, Data Compression Fourth Edition, Northridge: Springer, 2007.
- [2] K. Sayood, Introduction to Data Compression, Waltham: Elsevier, 2012.
- [3] I. W. Selesnick, "The *Slantlet* Transform," *IEEE-TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, vol. 47, 1999.
- [4] N. B. Patil, V. M. Viswanatha dan D. S. P. M. B, "SLANT TRANSFORMATION AS A TOOL FOR PRE-PROCESSING IN IMAGE PROCESSING," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 2, no. 4, 2011.
- [5] A. T dan L. Parameswaran, "*Slantlet* Transform and Phase Congruency based Image Compression," *International Journal of Computer Applications*, 2013.
- [6] E. Powers, W. Grady dan S. Santoso, "Power quality disturbance data compression using *Wavelet* transform methods," *IEEE Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 1250-1257, 2002.
- [7] D. Morrow dan T. Littler, "*Wavelets* for the analysis and compression of power system disturbances," *IEEE Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 358-364, 2002.
- [8] S. Grgic, M. Grgic dan B. Z. Cihlar, "Performance analysis of image compression using *Wavelets*," *IEEE Industrial Electronics*, vol. 48, no. 3, pp. 682-695, 2001.