

Hasil Penelitian  
Yang Tidak Dipublikasikan

Citra *High Dynamic Range* (HDR) dan Pembentukannya  
Menggunakan Metode *Multiple Exposure Frame*



UNIVERSITAS  
**BAKRIE**

Irwan Prasetya Gunawan  
Guson P. Kuntarto  
Berkah I. Santoso

Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer  
Universitas Bakrie  
Jakarta  
2021

**LEMBAR PENGESAHAN HASIL PENELITIAN YANG TIDAK DIPUBLIKASIKAN  
TAHUN 2021**

1. Judul Penelitian : Citra *High Dynamic Range* (HDR) dan Pembentukannya Menggunakan Metode *Multiple Exposure Frame*
2. Peneliti Utama
  - a. Nama Lengkap : Irwan Prasetya Gunawan, Ph.D
  - b. Jenis Kelamin : Laki Laki
  - c. Pangkat / Golongan / NIDN : Lektor / III c / 0301107306
  - d. Bidang Keahlian : Multimedia Processing, Data Communication
  - e. Program Studi : Informatika
3. Tim Peneliti : Guson P. Kuntarto, ST, M.Sc. & Berkah I. Santoso, ST, MTI / Informatika / Informatika
4. Jangka waktu penelitian : 1 Sept 2020 – 25 Feb 2021

Jakarta, 25 Februari 2021

Menyetujui,

**Ketua Lembaga Penelitian dan  
Pengembangan**

( Deffi Ayu Puspito Sari, Ph.D. )  
0308078203

**Peneliti Utama**



( Irwan Prasetya Gunawan, Ph.D. )  
0301107306

## Abstrak

Laporan ini memaparkan metode pembentukan citra High Dynamic Range (HDR) dengan teknik multi-exposure frame (MEF). Beberapa algoritma mendasar serta terkini yang terkait dengan metode MEF akan dipaparkan di sini. Pada umumnya, metode-metode tersebut bisa dilakukan pada domain spasial maupun domain transformasi (atau frekuensi). Pemaparan berlanjut pada metode pengukuran kualitas berbasis reduced-reference untuk citra HDR. Secara khusus, akan dijelaskan cara ekstraksi fitur dan pemilihan data overhead yang digunakan pada model reduced-reference yang sesuai dengan citra HDR. Selanjutnya optimalisasi jumlah data fitur yang digunakan sebagai informasi dalam pengukuran kualitas juga akan dilakukan. Dari sini kemudian akan dicari formulasi metrik kualitas citra HDR. Baseline yang digunakan sebagai acuan model reduced-reference yang akan dikembangkan adalah model full-reference untuk citra HDR yang sudah ada di literatur. Selain itu, model reduced-reference yang dikembangkan dalam penelitian ini akan dicocokkan pula dengan data-data pengukuran subjektif yang sudah tersedia secara publik.

# Daftar Isi

Daftar Gambar	iv
Daftar Tabel	v
1 Latar Belakang	1
1.1 Latar Belakang . . . . .	1
1.2 Permasalahan . . . . .	1
2 <i>High Dynamic Range</i>	2
2.1 Sistem HDR . . . . .	2
2.2 Evaluasi kualitas gambar . . . . .	3
2.2.1 Umum . . . . .	3
2.2.2 Pengukuran kualitas gambar SDR . . . . .	3
2.2.3 Metode evaluasi gambar HDR . . . . .	5
3 <i>Multi Exposure Frame</i>	6
4 Metodologi Penelitian	10
4.1 Metode . . . . .	10
4.2 Ekstraksi Fitur . . . . .	10
4.3 Formulasi Indeks Kualitas . . . . .	14
5 Hasil yang Dicapai	15
5.1 Dataset . . . . .	15
5.2 Hasil . . . . .	15
6 Kesimpulan	17
Bibliografi	18

## Daftar Gambar

1	Kategori pengukuran kualitas gambar . . . . .	4
2	Multi Exposure Frame (MEF) . . . . .	9
3	Gambar asli dan gambar uji/olahan beserta histogramnya dari dataset. Gambar uji diproses dengan metode <i>global adjustment</i> . . . . .	11
4	Gradien gambar asli dan gambar uji/olahan beserta histogramnya dari dataset. Gambar uji diproses dengan metode <i>global adjustment</i> . . . . .	11
5	Metode ekstraksi fitur . . . . .	12

## Daftar Tabel

1	Ringkasan metode pembentukan gambar HDR menggunakan metode MEF . . .	7
2	Hasil percobaan menggunakan skor QE berdasarkan fitur spasial . . . . .	16

# 1 Latar Belakang

## 1.1 Latar Belakang

Perkembangan layanan jasa multimedia saat ini mengarah pada penyediaan layanan yang memiliki *quality of experience* yang memuaskan penggunanya.

Layanan multimedia visual baik berupa gambar maupun video bertujuan untuk mereproduksi informasi visual yang semakin menyerupai persepsi penglihatan mata manusia (*human visual system*). Ini ditunjukkan oleh trend teknologi tampilan visual dalam beberapa tahun terakhir seperti layar plasma, UHD (*ultra high definition*), 3D, dan HDR (*High Dynamic Range*).

Dari berbagai macam teknologi baru ini, HDR dianggap sebagai teknologi yang mampu menampilkan informasi visual dengan tampilan yang menyerupai persepsi penglihatan mata manusia, berbeda dengan teknologi berbasis SDR (*Standard Dynamic Range*). Ini karena mata manusia dapat menangkap detail objek yang tidak tertangkap oleh perangkat berbasis SDR.

## 1.2 Permasalahan

Tantangan pada pengukuran kualitas gambar HDR, karena kemampuannya menampilkan semua objek pada gambar, adalah tingginya sensitivitas HVS terhadap error/distorsi pada gambar.

Pengaruh kompresi data gambar bisa akan sangat terasa jika rasio kompresinya terlalu agresif. Pengaruh distorsi gambar bisa jadi memiliki tanggapan respon yang berbeda pada HDR, tidak seperti halnya pada SDR. Oleh karena itu, metode pengukuran kualitas visual yang selama ini sudah digunakan pada SDR akan menjadi kurang cocok apabila digunakan untuk gambar dengan teknologi HDR. Ini menunjukkan bahwa metode pengukuran kualitas gambar HDR menjadi hal yang sangat dibutuhkan seiring dengan semakin berkembangnya teknologi HDR.

Selain itu, saat ini metode pengukuran kualitas gambar HDR masih banyak yang menggunakan metode FR dan NR [1]. Pengembangan metode pengukuran berbasis RR masih belum banyak dilakukan. Padahal metode RR ini akan sangat berguna untuk aplikasi monitoring kualitas pengiriman gambar pada layanan berbasis streaming, misalnya. Monitoring kualitas layanan video streaming dengan hanya berpatokan pada bit rate masih belum memadai karena patokan bit rate belum tentu selalu sepadan dengan kualitas visual yang dinikmati oleh pengguna. Kurangnya eksplorasi metode pengukuran kualitas berbasis RR untuk citra HDR inilah yang menjadi landasan permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian kali ini.

## 2 *High Dynamic Range*

### 2.1 Sistem HDR

HDR dianggap sebagai teknologi yang mampu menampilkan informasi visual dengan tampilan yang menyerupai persepsi penglihatan mata manusia [2, 3] dan dapat memberikan *quality of experience* yang lebih memuaskan bagi penggunanya.

Hal ini terjadi karena jangkauan tanggapan HDR yang lebar mampu menangkap informasi visual yang sebelumnya tidak bisa ditangkap oleh teknologi yang berbasis SDR (*Standard Dynamic Range*). Pada SDR, misalnya, gambar yang ditangkap oleh perangkat dengan berbasis SDR akan memiliki bagian-bagian gambar yang terlalu gelap (*under expose*) atau terlalu terang (*over expose*) pada kondisi-kondisi pencahayaan tertentu. Padahal, pada kondisi cahaya tersebut, mata manusia secara langsung bisa jadi masih dapat menangkap detail objek yang tidak tertangkap oleh perangkat berbasis SDR ini.

Teknologi HDR pun sudah mulai bisa dijangkau secara lebih luas melalui perangkat-perangkat elektronik seperti *smartphone* yang kita gunakan sehari-hari [4]. Citra HDR tidak harus melulu dihasilkan oleh sensor citra spesifik, melainkan dapat dihasilkan melalui teknik penggabungan citra dengan kondisi eksposure yang berbeda (*multi exposure frame*) [5–7]. Cara lainnya adalah dengan memanfaatkan *rendering* pada komputer [8].

Di lain pihak, tampilan citra HDR tidak harus selalu menggunakan layar/tampilan HDR. Meskipun di pasaran saat ini perangkat tampilan HDR yang memiliki kemampuan tampilan kontras, warna, dan pencahayaan yang lebih lebar sudah banyak tersedia [9], tampilan konvensional dapat juga menampilkan citra/video HDR dengan menggunakan teknik pemetaan berbasis *tone mapping operator* (TMO) [10, 11]. Dengan kata lain, aksesibilitas konten HDR bagi publik sudah terbuka cukup luas.

Konten citra/video HDR yang memiliki kedalaman bit yang jauh lebih lebar daripada citra/video konvensional tentunya akan memberikan tantangan tersendiri pada proses pendistribusiannya. Hal ini dijawab dengan dikembangkannya metode kompresi JPEG-XT [12–14]. Algoritma kompresi JPEG-XT untuk citra HDR bersifat *backward compatible* karena citra HDR yang diproses dengan algoritma ini dapat ditampilkan pada layar konvensional non-HDR. Hal ini dimungkinkan karena pengkodeannya memanfaatkan *residual layer* seperti yang dilakukan oleh proses encoding yang bersifat *scalable*. Pada perangkat non-HDR, citra HDR terkompresi bisa direkonstruksi ulang hanya dengan menggunakan *base layer* dengan algoritma yang sama seperti algoritma JPEG konvensional. Konsekuensinya adalah kemungkinan terjadinya degradasi kualitas gambar.



## 2.2 Evaluasi kualitas gambar

### 2.2.1 Umum

Umumnya pengukuran kualitas dilakukan dengan metode subjektif yang melibatkan beberapa pengamat. Hal ini tentunya akan mengeluarkan biaya yang tinggi dan sangat tidak praktis. Oleh karena itu digunakan metode yang lebih murah, lebih cepat dan mudah untuk diintegrasikan ke suatu sistem ataupun aplikasi, yaitu metode pengukuran kualitas secara objektif.

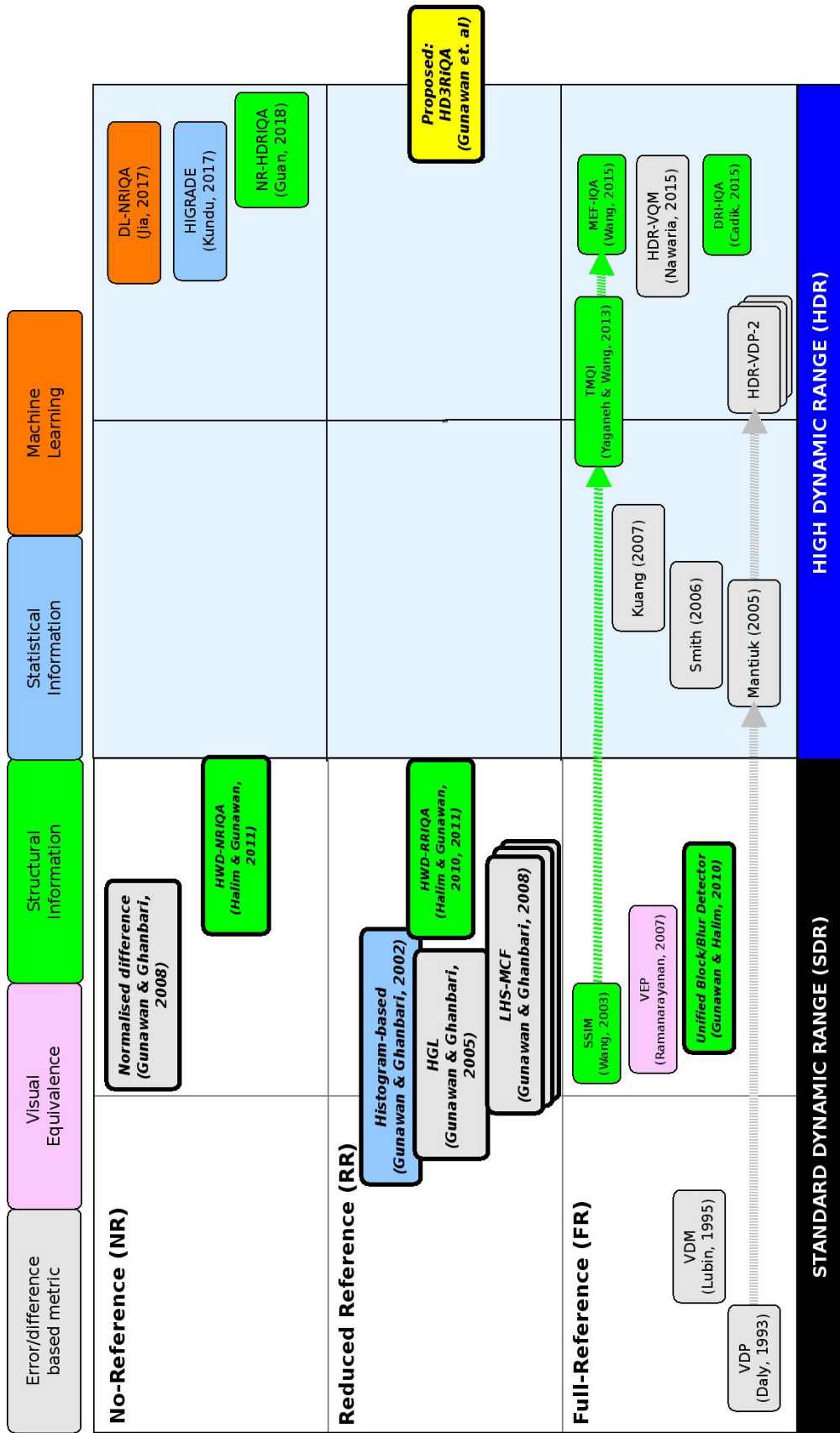
Pengukuran kualitas visual secara objektif ini bisa dilakukan dengan berbagai metode komputasi yang memanfaatkan faktor-faktor HVS, kontras, warna, struktur, error/distorsi pada gambar, dan sebagainya. Teknik pengukuran kualitas gambar digital dengan metode objektif dapat dibagi menjadi tiga pendekatan utama. Pendekatan pertama, metode Full-Reference (FR), membutuhkan gambar referensi yang memiliki kualitas yang bagus sebagai pembanding. Pendekatan kedua, Reduced-Reference (RR), menggunakan informasi tertentu yang didapatkan pada gambar referensi untuk melakukan pengukuran kualitas gambar. Pendekatan ketiga, No-Reference (NR), tidak menggunakan informasi apa pun dalam melakukan proses pengukuran kualitas gambar. Metode pengukuran kualitas visual gambar/video yang rata-rata dikembangkan sebelum tahun 2010 pada umumnya ditujukan untuk pengukuran kualitas visual pada jangkauan teknologi SDR. Secara singkat hal ini dijelaskan dalam peta jalan penelitian pengukuran kualitas gambar (Gambar 1)

### 2.2.2 Pengukuran kualitas gambar SDR

MSE (*Mean Square Error*) dan PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) adalah ukuran kualitas gambar yang umumnya banyak digunakan karena metode perhitungannya yang sangat sederhana. Namun, kedua ukuran tersebut memerlukan suatu gambar referensi (termasuk ke dalam metode FR) yang dalam hal praktis sering kali tidak dapat tersedia. Selain itu, MSE dan PSNR sendiri kurang mencerminkan persepsi manusia karena korelasinya dengan kualitas subjektif sangat rendah. Turunan dari metode MSE/PSNR ini banyak dan rata-rata memanfaatkan tingkat *visibilitas* error pada gambar jika dilihat oleh mata manusia. Metode pengukuran seperti VDP (*Visual Differences Predictor*) [15] dan VDM (*Video Distortion Meter*) [16] adalah turunan dari metode berbasis visibilitas error ini.

Sebagai alternatif terhadap metode berbasis visibilitas error ini, ada pula pendekatan pengukuran kualitas gambar dengan metode Full-Reference berdasarkan ukuran distorsi struktural; misalnya UQI (*Universal Quality Index*) [17] dan SSIM (*Structural Similarity*) [18]. Kedua teknik tersebut cukup banyak digunakan karena memiliki hasil yang baik, tetapi terbatas untuk gambar yang memiliki referensi.

Untuk mengukur kualitas gambar secara objektif menggunakan pendekatan No-Reference (NR), pengukuran distorsi yang terjadi pada gambar adalah salah satu dari banyak teknik



Gambar 1: Kategori pengukuran kualitas gambar

yang digunakan. Bentuk distorsi utama yang dapat terlihat pada gambar adalah *blur* dan *blockiness*. Sebuah teknik dengan pendekatan NR untuk mengukur *blur* secara perceptual dapat dilakukan dengan mengukur kelebaran tepian/*edge* [19]. Di lain pihak, teknik untuk mengukur *blockiness* yang terjadi pada gambar dapat dilakukan berdasarkan karakteristik lokal dari gambar [20]

Di antara kedua ekstrem FR dan NR, teknik pengukuran kualitas gambar lainnya adalah dengan pendekatan *Reduced-Reference* (RR), misalnya berdasarkan fitur yang diekstraksi dari area lokal pada gambar [21, 22].

### 2.2.3 Metode evaluasi gambar HDR

Pengukuran kualitas gambar HDR bisa didekati dari beberapa cara. Pertama, dengan memperhitungkan cara pembentukan gambar HDR. Misalnya, untuk rekonstruksi gambar fotografi HDR menggunakan *tone mapping operator*, telah dikembangkan metode-metode evaluasi oleh [23–28]. Degradasi warna yang mungkin terjadi pada reproduksi citra HDR juga telah dilakukan [29]. Seiring dengan itu, beberapa peneliti sudah melakukan evaluasi terhadap algoritma kompresi JPEG-XT [30, 31]. Metode pengukuran ini pada umumnya merupakan metode pengukuran dengan tujuan yang sangat spesifik, dan membutuhkan rujukan berupa *reference image* sehingga bisa dikategorikan ke dalam metode FR.

Metode lain pengukuran kualitas gambar HDR adalah dengan mengembangkan metode pengukuran gambar SDR agar bisa digunakan pada konten HDR. Contohnya, metode HDR *visual detection predictor* (HDR-VDP) yang dikembangkan oleh [32] adalah teknik yang dikembangkan dari metode VDP [15]. Metrik TMQI (*tone-mapped image quality index*) yang dikembangkan oleh [33] merupakan pengembangan dari metrik SSIM [18] untuk gambar SDR. Pengembangan metrik untuk video HDR juga sudah dilakukan oleh [34].

Visualisasi distorsi pada gambar HDR juga merupakan informasi yang kadang kala dibutuhkan oleh pengguna (contohnya untuk fotografer yang membutuhkan informasi mengenai area pada gambar yang intensitas warnanya mengalami *clipping*). Metode yang dikembangkan oleh [35] menghasilkan pemetaan distorsi pada gambar HDR selain juga menghasilkan *score* untuk menilai kualitas gambarnya secara objektif.

Kesemua metode di atas pada umumnya termasuk ke dalam kategori FR. Metode lain yang sudah dikembangkan ada pada kategori NR. Contohnya adalah metode yang dikembangkan oleh [36] yang menggunakan informasi statistik pada gambar HDR untuk pengembangan metriknya. Sementara itu [37] mengembangkan metode pengukuran NR untuk HDR dengan menggunakan *convolutional neural network*(CNN). Metrik yang dikembangkan oleh [38] menggunakan fitur yang diturunkan dari informasi struktural pada gambar.

### 3 *Multi Exposure Frame*

Teknik *Multi Exposure Fusion* (MEF) banyak digunakan dalam perangkat elektronik konsumen komersial dan berguna sangat baik untuk meningkatkan kualitas gambar hasil olahan. Walaupun demikian, masih sangat sedikit penelitian yang dilakukan untuk mengevaluasi kualitas perseptif gambar yang diperoleh dengan metode MEF ini [39]. MEF mengambil serangkaian gambar dengan berbagai tingkat paparan yang berbeda sebagai input dan mensintesis gambar keluaran yang lebih informatif dan menarik secara visual daripada gambar-gambar inputnya [39]. Gambar gabungan yang dibentuk oleh MEF dapat digunakan sebagai gambar HDR alami dan bahkan bisa memiliki tingkat kebisingan gambar yang lebih rendah daripada gambar-gambar inputnya [39–42]. Secara ringkas, beberapa metode MEF ini diberikan dalam Tabel 1.

Sejak 1980 [52], MEF telah menjadi topik penelitian aktif dan menarik perhatian yang semakin meningkat dalam beberapa tahun terakhir [43–45, 53]. Dengan banyaknya algoritma MEF, sangat penting untuk membandingkan kinerjanya untuk menemukan algoritma dan pedoman terbaik untuk kemajuan lebih lanjut. Karena sistem visual manusia (HVS) adalah penerima utama di sebagian besar aplikasi, MEF membutuhkan evaluasi subyektif yang sederhana dan dapat diandalkan untuk menilai kualitas gambar yang digabungkan [45, 46, 54]. Evaluasi subyektif menyediakan serangkaian uji untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja relatif berbagai algoritma MEF.

Pada dasarnya, MEF yang digunakan untuk pembentukan gambar HDR membutuhkan penilaian kualitas gambar baik penilaian subyektif maupun penilaian obyektif. Gambar High Dynamic Range (HDR) dapat memberikan jangkauan pencahayaan dan warna yang lebih luas sehingga kualitas pengalaman visual mendekati sistem penglihatan manusia (HVS) [55, 56]. Namun, karena tingkat pencahayaan yang besar dan kecerahan layar HDR yang lebih tinggi, penampilan artefak dapat dilihat dengan lebih jelas [56].

Hanya sedikit penelitian yang khusus ditujukan untuk metode mempelajari kualitas gambar hasil pengolahan MEF. Misalnya, [47, 57] mendefinisikan bobot gabungan secara lokal tanpa pertimbangan yang memadai tentang konsistensi di lingkungan yang besar yang dapat menyebabkan penampilan yang tidak wajar dalam hasil keluaran gabungan. Beberapa metode membagi gambar masukan ke berbagai area menggunakan blok berukuran seragam atau teknik segmentasi dan mencoba memaksimalkan pengukuran kualitas tertentu di tiap-tiap area yang sudah terbagi-bagi tersebut. Kelemahannya, informasi antar wilayah tidak dimanfaatkan secara efektif, sehingga artefak di perbatasan objek/wilayah cenderung disebabkan oleh metode ini. Metode MEF biasanya bekerja lebih baik di perbatasan regional dengan mencampur bobot gabungan menggunakan skala yang berbeda dan meningkatkan fungsi gambar utama. Namun, bobot masih ditentukan terutama secara lokal tanpa memperhitungkan informasi yang lebih umum tentang lingkungan sekitar,

Tabel 1: Ringkasan metode pembentukan gambar HDR menggunakan metode MEF

Paper	Metode	Kelebihan	Kekurangan
[39]	Multi exposure fusion algorithm	Korelasi yang baik dengan penilaian subjektif dan memiliki performa yang baik dibandingkan lainnya.	Tidak bisa diterapkan untuk konten gambar yang beragam
[41]	Gradient based synthesized multiple exposure	Menghasilkan gambar HDR dengan kualitas yang baik dari gabungan gambar asli dengan kualitas rendah.	Tidak bisa digunakan untuk gambar berwarna
[42]	New multiple exposure time image synthesis technique	Gambar HDR dengan kualitas tinggi dengan level maksimum pada detail dan informasi warna RGB	Terbatas pada konten yang bersifat statik
[43]	Fused gradient field	Efisien dan efektif	Algoritmanya terbatas untuk pergerakan yang terbatas
[44]	New quadratic optimization	Bisa memperbaiki penampilan detail untuk menghasilkan gambar yang lebih tajam	Saturasi warna cenderung menurun
[45]	New probabilistic exposure fusion scheme	Memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan metode lainnya	Rating dan ranking tidak dapat diterapkan karena metode yang terlalu kompleks
[46]	A novel fusion algorithm based on perceptual quality measures	Performa yang lebih baik dibandingkan metode lain	Sulit untuk memperluas metode ini pada gambar dengan beberapa sumber
[47]	Fuse multi-exposure images of a static scene taken by a stationary camera	Tidak ada pengaruh untuk warna dan kontras secara lokal	Gambar mesti dipilih secara hati-hati dengan ukuran yang tepat dan akurat
[48]	Fuse a bracket exposure sequence	Sebanding dengan metode tone mapping operator	Tidak optimal untuk performa perangkat lunaknya karena waktu operasi yang kurang cepat
[49]	Single exposure-based image fusion using multi-transformation	Bisa menghasilkan gambar yang memiliki tampilan yang menarik dengan jangkauan dinamik yang sesuai dengan mata manusia	-
[50]	A new color multi-exposure image fusion	Penampilan warna yang lebih baik daripada metode lainnya	Tidak bisa menggabungkan gambar dengan multi-exposure secara dinamis
[51]	A new multi-exposure image fusion method based on exposure compensation	Lebih baik daripada metode lainnya dilihat dari sisi TMQI, metode statistik dan entropy diskret.	Tidak ada kejelasan untuk menentukan nilai eksposur yang sulit diatur pada saat pengambilan gambar

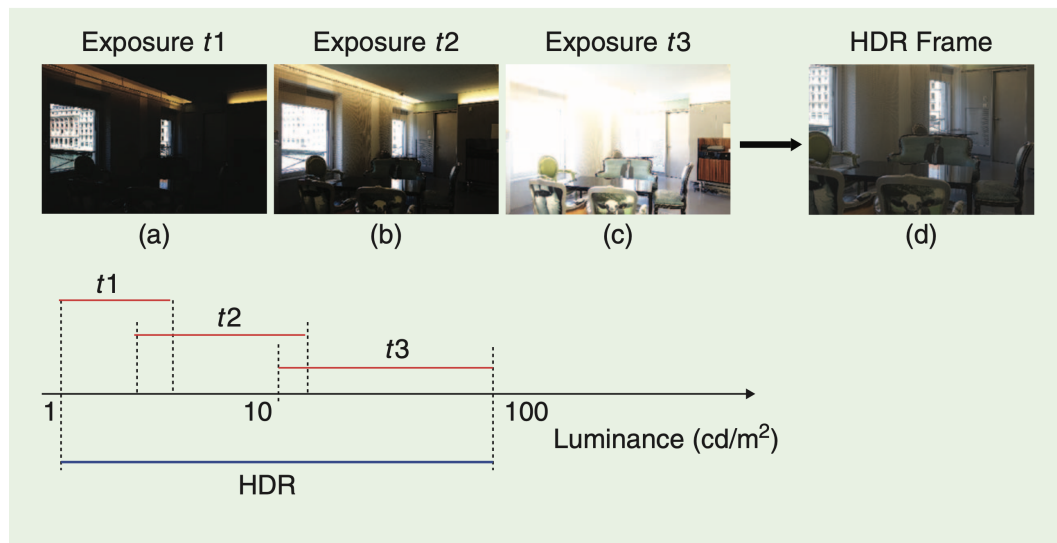
sehingga hasilnya mungkin agak tidak konsisten. Beberapa metode penggabungan secara umum yang sebelumnya diusulkan [58, 59] tidak dioptimalkan untuk aplikasi individual dan hanya diterapkan pada gambar dengan warna derajat keabuan.

Goshtasby [47] menggunakan metode penggabungan gambar statis multi-eksposure menjadi gambar dengan konten informasi maksimum dari kamera stasioner. Metode ini membagi domain gambar ke dalam blok yang seragam dan memilih gambar dengan informasi terbanyak di blok untuk setiap blok. Mertens *dkk* Citemartens2009 mengusulkan teknik untuk memadukan urutan gambar menjadi gambar berkualitas tinggi tanpa mengubahnya menjadi HDR. Eliminasi pembentukan HDR berbasis fisik menyederhanakan rangkaian proses untuk HDR, sekaligus menghindari kalibrasi kurva respons kamera dan efisien secara komputatif. Teknik ini menggabungkan beberapa exposure, mengambil kontras yang sesuai, saturasi tinggi dan paparan yang baik untuk memandu proses MEF. Metode ini menggunakan peta pembobotan yang sama untuk memandu fusi dalam domain spasial. Batas buatan dan distorsi warna pada gambar yang menyatu.

Song *dkk* [45] menunjukkan bahwa gambar awal pertama kali diperkirakan dengan memaksimalkan kontras visual dan gradien adegan. Kemudian gambar leburan disintesis dengan menekan pembalikan dalam gradien gambar. Metode serupa MEF berdasarkan gradien diusulkan dalam cite gu2012. Berdasarkan Li *dkk*. [44] dan Mertens *dkk* [48] yang meningkatkan detail gambar yang digabungkan dengan menyelesaikan masalah optimasi kuadrat. Metode filter MEF berbasis median dan rekursif dikembangkan di [60], dengan mempertimbangkan perbedaan lokal, kecerahan dan perbedaan warna. Penggunaan filter media juga dapat menangani adegan dinamis. Pendekatan berbasis gradien baru untuk mengekstraksi detail gambar diperkenalkan oleh cite A.Rovid2007. Beberapa gambar eksposur dari pemandangan yang sama dengan data input digunakan. Gambar dibagi menjadi beberapa wilayah selama pemrosesan.

Di sisi lain, Kinoshita *dkk*. [51] mengusulkan metode MEF baru berdasarkan kompensasi exposure untuk meningkatkan kualitas input gambar multi-eksposur. Metode yang diusulkan menggunakan hubungan antara nilai eksposur dan nilai piksel untuk meningkatkan kualitasnya. Zeng *dkk*. [54] membangun database MEF untuk mengevaluasi kualitas gambar yang dihasilkan oleh berbagai algoritma MEF dan delapan algoritma MEF dipilih. Yun *dkk*. [49] mengusulkan metode peregangan gambar dengan menggabungkan gambar multi-transformasi. Ini menghasilkan gambar yang diregangkan secara berbeda untuk masing-masing gambar dan kemudian menggabungkannya untuk meningkatkan jangkauan perseptual dinamis sekaligus mengurangi efek blur karena pergerakan. Tidak hanya itu, Huang *dkk*. [50] mengusulkan pendekatan MEF gambar berwarna baru untuk memecahkan masalah kehilangan detail visual dan warna-warna cerah. Metode yang diusulkan didasarkan pada patch gambar yang dipecah menjadi tiga bagian terpisah: ekstraksi kontras, pelestarian struktur dan penyesuaian intensitas.

Deskripsi pendekatan MEF ditunjukkan pada Gambar ??; tiga gambar dari peman-



Gambar 2: Pembentukan gambar HDR menggunakan metode MEF pada tiga eksposur berbeda (a)  $t_1$ , (b)  $t_2$ , and (c)  $t_3$ , dengan  $t_i$  menyatakan waktu eksposur (d) gambar HDR yang dihasilkan. Gambar HDR ditampilkan dengan menggunakan *tone mapped* [61]

dangan yang sama bervariasi dari waktu ke waktu. Versi (nada dipetakan) dari HDR yang dihasilkan juga diberikan. Masalah umum dengan metode MEF adalah ketidakjelasan gambar, baik karena gerakan objek atau oleh gerakan kamera itu sendiri. Gabungan gambar dalam gambar keluaran HDR tanpa pemrosesan artefak lebih lanjut. Di bawah ini dapat diklasifikasikan cacat sebagai berikut:

- Ketidakselarasan secara global karena pergerakan kamera, mis. gerakan atau rotasi kamera. Jenis ketidaksejajaran ini mempengaruhi semua piksel gambar yang menyebabkan timbulnya “*ghost artifacts*” yang dapat dihapus dengan metode registrasi gambar.
- Ketidakselarasan lokal karena pergerakan objek dalam gambar, yang akan mempengaruhi hanya sebagian area pada gambar. Distorsi seperti ini terjadi ketika waktu antara tiap eksposur lebih besar daripada kecepatan pergerakan objek. Contohnya misalnya, beberapa objek dapat ditemukan dalam satu gambar, tetapi tidak dapat dilihat pada objek lain.
- Kombinasi distorsi lokal dan global yang merupakan gabungan dari kedua jenis distorsi di atas. Contohnya adalah kamera yang bergerak bebas untuk dapat menangkap gerakan objek yang dinamis.



## 4 Metodologi Penelitian

### 4.1 Metode

Penelitian dilakukan dengan melakukan analisis dan simulasi menggunakan perangkat lunak. Pengembangan alat bantu pengukuran kualitas sederhana juga akan dilakukan untuk mendukung pengembangan metode pengukuran objektif yang akan dibuat. Algoritma pengukuran objektif kemudian akan divalidasi menggunakan model kelompok training dan test. Validasi dilakukan dengan menghitung korelasi antara nilai kualitas gambar objektif hasil algoritma dengan kualitas gambar subjektif masing-masing gambar yang dijadikan sampel. Korelasi yang dihitung adalah korelasi Pearson, yang mencerminkan tingkat akurasi prediksi, dan korelasi Spearman yang mencerminkan tingkat urutan rank hasil kualitas gambar objektif. Pengukuran performa menggunakan parameter korelasi ini adalah metode yang umum dilakukan pada penelitian pengukuran kualitas gambar dan video [62].

Untuk mengoptimalkan hasil perhitungan kualitas objektif, dapat dilakukan metode pemetaan hasil *score* objektif ke data subjektif menggunakan metode regresi. Untuk citra SDR, pada umumnya regresi yang dilakukan adalah regresi non-linear. Sementara itu, untuk HDR yang direkomendasikan adalah regresi linear.

Pada penelitian yang diusulkan kali ini, data sampel adalah data gambar dari basis data HDR yang sudah tersedia secara publik [1]. Gambar dari basis data tersebut dipilih sebab gambar-gambar tersebut sudah memiliki nilai subjektif yang dapat dijadikan acuan untuk proses validasi algoritma.

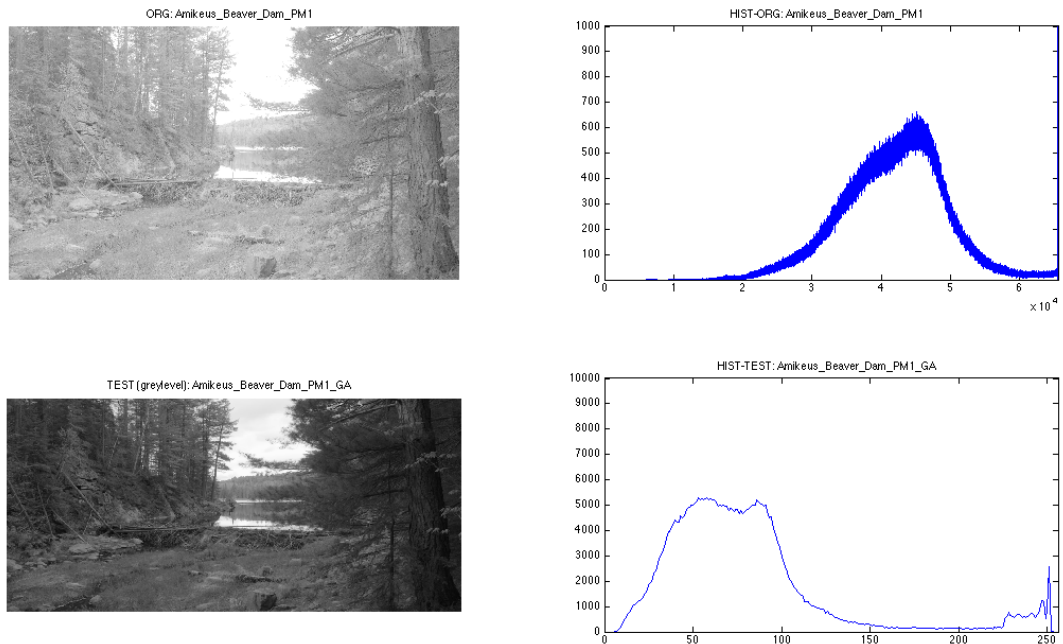
Dari paparan pada Tinjauan Pustaka didapat bahwa metode pengukuran kualitas gambar HDR masih banyak yang menggunakan metode FR dan NR. Pengembangan metode pengukuran berbasis RR masih belum banyak dilakukan. Padahal metode RR ini akan sangat berguna untuk aplikasi monitoring kualitas pengiriman gambar pada layanan berbasis streaming, misalnya.

### 4.2 Ekstraksi Fitur

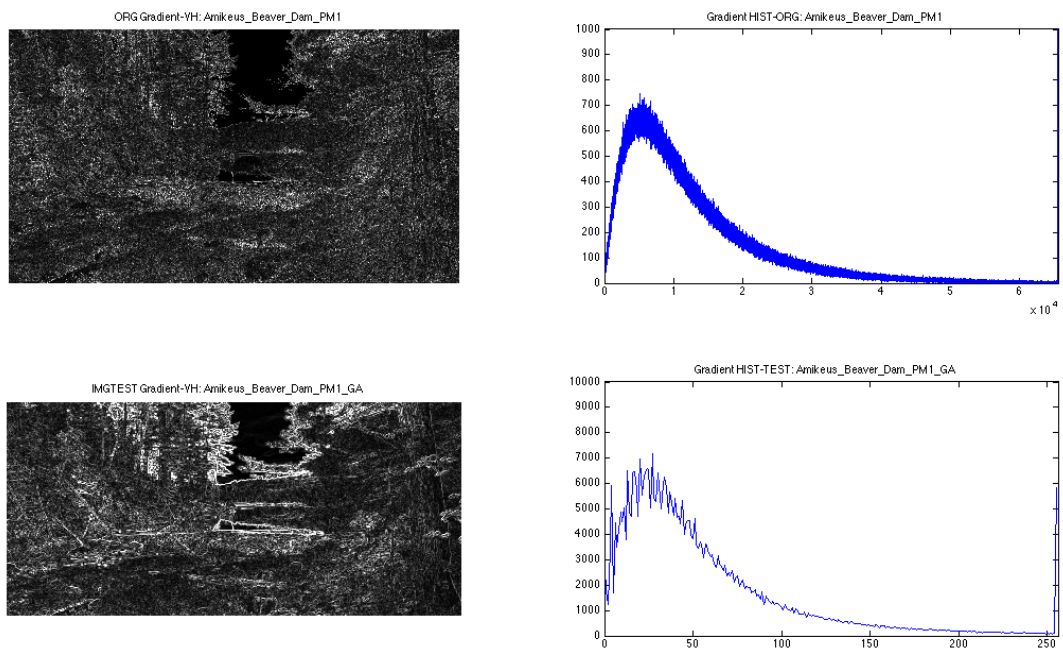
Metode yang kami usulkan menggunakan fitur sederhana berdasarkan kekuatan tepi terakumulasi yang dinormalisasi untuk fitur RR. Kami mencatat bahwa fitur serupa berdasarkan tepi telah digunakan dalam karya sebelumnya pada evaluasi kualitas terkait HDR yang dilaporkan oleh orang lain, tetapi hanya dalam model full-reference referensi lengkap atau tanpa referensi (NR). Dalam penelitian kami saat ini, kami ingin menyelidiki bagaimana fitur sederhana ini dapat diadopsi untuk fitur RR dalam kerangka pengukuran kualitas gambar HDR.



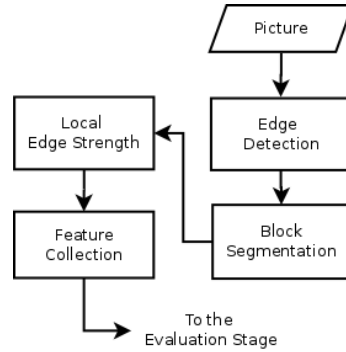
Kami tertarik pada fitur ini karena kami mencatat bahwa ada perubahan penting pada tepi gambar HDR yang dihasilkan berdasarkan MEF dan ITMO. Ini, misalnya, diilustrasikan dalam Gambar 3 dan Gambar 4, yang diambil dari dataset [63]. Kita dapat



Gambar 3: Gambar asli dan gambar uji/olahan beserta histogramnya dari dataset. Gambar uji diproses dengan metode *global adjustment*.



Gambar 4: Gradien gambar asli dan gambar uji/olahan beserta histogramnya dari dataset. Gambar uji diproses dengan metode *global adjustment*.



Gambar 5: Metode ekstraksi fitur

melihat dari Gambar 3 bahwa ada perubahan pada kecerahan global dari gambar yang diproses, yang juga tercermin pada pergeseran histogram gambar terkait. Gambar gradien pada Gambar 4 menunjukkan bahwa tepi gambar yang diproses telah berubah dalam hal kekuatan dan ketebalan relatifnya. Menariknya, histogram mereka menunjukkan sedikit perbedaan meskipun ada beberapa perubahan kecil yang terperinci. Pengamatan serupa ditemukan pada gambar-gambar lainnya pada dataset yang kami gunakan.

Karena itu, masuk akal jika pendekatan reduced-reference yang disajikan dalam penelitian kali ini menggunakan perbandingan relatif dari *edge strength*; yaitu., tepian objek yang diproses (karena MEF atau ITMO, misalnya) yang kemudian dibandingkan dengan tepian objek dari gambar referensi (HDR) sebagai estimasi atas kualitas gambar yang diproses. Perbedaan kualitas pada gambar yang diproses dapat dideteksi saat ada peningkatan (*gain*) atau penurunan (*loss*) pada besaran tepi objek gambar ini. Karena itu dapat dipahami jika besaran kuat tepian objek ini (atau lebih tepatnya, nilai akumulasinya) kami pilih sebagai fitur untuk informasi reduced-reference.

Metode ekstraksi fitur sederhana untuk membuat informasi rujukan tereduksi dilakukan sesuai dengan Gambar 5. Prosesnya terdiri atas deteksi tepi, segmentasi blok, dan perhitungan kekuatan tepian objek lokal.

Deteksi tepian objek akan memperkuat fitur tepian gambar yang bisa digunakan untuk proses selanjutnya. Deteksi tepian yang sederhana bisa dihasilkan dengan memanfaatkan dua jenis  $3 \times 3$  operator Sobel operator, yakni operator Sobel horisontal dan vertikal yang bisa diberikan oleh

$$Sobel_h = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

dan

$$Sobel_v = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

yang diterapkan pada gambar untuk mendapatkan dua gambar gradien,  $\nabla I_h(x, y)$  dan  $\nabla I_v(x, y)$ . Masing-masing gambar gradien ini membawa informasi horisontal dan vertikal dari gambar terkait. Gradien ini bisa dituliskan sebagai

$$\nabla I_h(x, y) = \text{Sobel}_h * I(x, y) \quad (3)$$

$$\nabla I_v(x, y) = \text{Sobel}_v * I(x, y) \quad (4)$$

dengan  $x$  dan  $y$  menyatakan koordinat dari piksel pada gambar  $I$ , dan  $*$  menyatakan operator konvolusi 2-D. Kedua gradien ini bisa digabung menjadi satu gambar gradient yang magnitude-nya bisa dinyatakan sebagai

$$G(x, y) = \sqrt{\nabla I_h(x, y)^2 + \nabla I_v(x, y)^2} . \quad (5)$$

Gambar gradien kemudian disegmentasi menjadi blok lokal dengan cara segmentasi yang tidak tumpang tindih. Ukuran blok harus cukup besar untuk memperhitungkan aktivitas spasial dalam setiap bloknya.

Ada *trade-off* antara ukuran blok analisis (yang setara dengan ukuran data yang dihasilkan pada skema rujukan tereduksi) dan akurasi pengukuran kualitasnya. Ukuran blok yang lebih besar berarti memperkecil laju data yang dihasilkan, tetapi juga mengurangi akurasi pengukuran kualitas gambarnya. Sebaliknya, ukuran blok yang lebih kecil kurang diminati karena ini berarti semakin besarnya data overhead untuk rujukan tereduksi yang digunakan.

Perhitungan kekuatan tepi lokal dilakukan untuk setiap blok di gambar gradien. Kami menggunakan blok ukuran  $b_m \times b_n$  piksel. Karena ada kemungkinan dimensi yang berbeda antara gambar asli dan gambar hasil proses, maka ukuran blok yang dari gambar masing-masing mungkin berbeda. Untuk masing-masing blok ini, besaran tepian objek kemudian diakumulasikan. Untuk mengakomodasi rentang dinamis yang berbeda antara gambar HDR asli dengan gambar hasil proses, kami menormalisasikan nilai akumulasi tepian objeknya agar sesuai dengan ukuran blok masing-masing.

Anggaplah  $G(x, y)$  adalah gambar gradien dengan lebar  $w$  dan tinggi  $h$ . Kita bisa menerapkan segmentasi blok yang tidak tumpang tindih dengan ukuran blok  $b_m \times b_n$  piksel. Blok-blok ini dapat diidentifikasi sesuai dengan posisi mereka pada gambar; misalnya, blok gradien  $G_{ij}$  adalah blok di baris ke- $i$  dan kolom ke- $j$ . Dengan cara ini, setiap blok dapat dinyatakan sebagai

$$G_{ij}(x', y') = (x' + b_m(j - 1), y' + b_n(i - 1)), \quad (6)$$

$$0 \leq x' < b_m, \quad 0 \leq y' < b_n$$

dengan  $(x', y')$  menyatakan koordinat dari piksel relatif di dalam blok  $G_{ij}$ , sementara  $i$  and  $j$  nilainya berkisar pada

$$1 \leq i \leq \lfloor h/b_m \rfloor \text{ and } 1 \leq j \leq \lfloor w/b_n \rfloor . \quad (7)$$

Fitur reduced-reference kami adalah

$$F_{ij}(u, v) = \frac{\sum G_{ij}(x', y')}{b_m b_n E_{\max}} \quad (8)$$

dengan  $E_{\max}$  menyatakan nilai maksimum yang mungkin yang dihitung pada besaran tepian objek pada blok tempat kita melakukan perhitungan. Fitur  $F_{ij}(u, v)$  kemudian kita hitung pada semua bagian gambar.

Fitur lain berdasarkan *luminance* juga diselidiki; misalnya, kami menggunakan gambar *luminance* terakumulasi (bukan besaran tepian lokal seperti sebelumnya) serta gambar *luminance* rata-rata. Semua fitur dihitung dalam setiap blok.

### 4.3 Formulasi Indeks Kualitas

Indeks kualitas yang kami gunakan pada tahapan penelitian kali ini ada beberapa. Pertama adalah

$$QE1 = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} [f^{(pro)}(x, y) - f^{(ref)}(x, y)]^p \quad (9)$$

dengan  $M$  and  $N$  menyatakan matriks baris dan kolom dari fitur yang digunakan, sementara  $f^{(ref)}(x, y)$  dan  $f^{(pro)}(x, y)$  menyatakan fitur rujukan dari gambar pada koordinat  $(x, y)$  dan fitur gambar proses pada koordinat  $(x, y)$ , sementara  $p$  adalah parameter variasi pada fitur. Indeks yang kedua diberikan oleh

$$QE2 = -10 \log_{10} \left( \frac{QE1}{R^2} \right) \quad (10)$$

dengan  $R$  menyatakan nilai maksimum yang mungkin antara selisih fitur gambar rujukan dan gambar proses. Terakhir, indeks yang kami gunakan adalah

$$QE3(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (11)$$

dengan  $l(x, y)$  menyatakan perbandingan luminance,  $c(x, y)$  kontras, dan  $s(x, y)$  struktur dan  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  adalah konstanta positif. Indeks pada (9) dan (10) adalah modifikasi dari MSE dan PSNR sementara indeks pada (11) diadopsi dari indeks SSIM [18].

## 5 Hasil yang Dicapai

### 5.1 Dataset

Gambar yang digunakan pada tahapan penelitian kali ini berasal dari LIVE HDR Image Databases [40, 63]. Pada database ini, gambar rujukan sebagian besar diambil dari HDR Photographic Survey [64].

### 5.2 Hasil

Dalam tahapan penelitian kali ini kami ingin menyelidiki kesesuaian berbagai fitur yang diekstraksi dari informasi spasial sederhana untuk pengukuran kualitas dengan rujukan yang tereduksi. Hasil simulasi percobaan kami secara ringkas bisa dilihat di Tabel 2. Kami menemukan bahwa dari fitur di Tabel 2, besaran tepi rata-rata dan luminance rata-rata telah menunjukkan hasil yang menjanjikan ketika digunakan dengan metrik QE1 dan QE3. Ini ditunjukkan oleh nilai korelasi Pearson yang cukup tinggi di antara kombinasi fitur dan indeks kualitas lainnya.

Nilai-nilai korelasi ini, bagaimanapun, masih lebih rendah daripada yang ditemukan dalam literatur menggunakan model full-reference (FR) dan no-reference (NR) untuk gambar HDR [39, 40, 65–68]. Nilai korelasi yang masih rendah ini mungkin berasal dari faktor dimensi gambar referensi yang berbeda dengan gambar proses. Ada juga faktor lain seperti *cropping* pada gambar proses yang dapat mempersulit proses *alignment* ketika membandingkan fitur dari gambar yang diproses dengan yang asli.

Walaupun demikian, kami berpendapat bahwa perbandingan dengan model FR yang ada pada literatur tidak akan adil untuk penelitian ini karena semua model FR memiliki kelebihan untuk menggunakan gambar asli dalam perhitungan indeks kualitasnya. Selain itu, semua model NR dalam literatur menggunakan perhitungan yang lebih kompleks daripada yang telah kami pelajari di sini.

Tabel 2: Hasil percobaan menggunakan skor QE berdasarkan fitur spasial

Quality Model	Feature Type	Pearson	Spearman	Outlier
QE1_Sqrt	AccEdgeStrength	0.167	0.251	0.000
QE1_1	AccEdgeStrength	-0.181	-0.251	0.000
QE1_Square	AccEdgeStrength	0.164	0.298	0.000
QE1_Cubed	AccEdgeStrength	0.203	0.298	0.000
QE2_Sqrt	AccEdgeStrength	0.135	0.301	11.570
QE2_1	AccEdgeStrength	0.207	0.301	0.000
QE2_Square	AccEdgeStrength	0.112	0.286	34.711
QE2_Cubed	AccEdgeStrength	0.207	0.286	0.000
QE3	AccEdgeStrength	0.012	-0.015	0.000
QE1_Sqrt	AveEdgeStrength	-0.383	-0.255	0.000
QE1_1	AveEdgeStrength	-0.044	-0.124	0.000
QE1_Square	AveEdgeStrength	-0.373	-0.312	0.826
QE1_Cubed	AveEdgeStrength	-0.034	-0.154	0.826
QE2_Sqrt	AveEdgeStrength	-0.065	0.067	12.397
QE2_1	AveEdgeStrength	0.027	-0.067	0.000
QE2_Square	AveEdgeStrength	-0.147	-0.157	34.711
QE2_Cubed	AveEdgeStrength	0.225	-0.038	0.000
QE3	AveEdgeStrength	0.429	0.376	0.000
QE1_Sqrt	AccLuminanceImg	0.279	0.260	0.000
QE1_1	AccLuminanceImg	-0.281	-0.260	0.000
QE1_Square	AccLuminanceImg	0.267	0.246	0.000
QE1_Cubed	AccLuminanceImg	0.276	0.246	0.000
QE2_Sqrt	AccLuminanceImg	0.236	0.225	0.000
QE2_1	AccLuminanceImg	0.260	0.225	0.000
QE2_Square	AccLuminanceImg	0.204	0.207	9.091
QE2_Cubed	AccLuminanceImg	0.245	0.207	0.000
QE3	AccLuminanceImg	0.246	0.351	0.000
QE1_Sqrt	AveLuminanceImg	-0.115	-0.130	0.000
QE1_1	AveLuminanceImg	0.129	0.137	0.826
QE1_Square	AveLuminanceImg	-0.168	-0.137	21.488
QE1_Cubed	AveLuminanceImg	0.096	0.143	0.826
QE2_Sqrt	AveLuminanceImg	-0.315	-0.187	8.264
QE2_1	AveLuminanceImg	0.198	0.187	0.000
QE2_Square	AveLuminanceImg	-0.320	-0.174	25.620
QE2_Cubed	AveLuminanceImg	-0.322	-0.314	0.000
QE3	AveLuminanceImg	0.540	0.490	0.000

## 6 Kesimpulan

Dalam laporan ini, tinjauan literatur singkat untuk metode Multi Exposure Image Fusion (MEF) telah dibahas. Review algoritma mutakhir untuk penggabungan gambar pada domain piksel dan penggabungan menggunakan fitur juga sudah disajikan. Beberapa metode yang dipaparkan memiliki keterbatasan karena menghasilkan tampilan gambar yang kurang wajar. Selanjutnya penggabungan ini bisa diproses baik dalam domain spasial maupun domain transformasi (atau frekuensi). Metode penggabungan dengan transformasi menunjukkan hasil yang cenderung lebih baik karena memungkinkan penggunaan informasi yang relevan dan penting untuk sistem penglihatan manusia. Kemudian dipaparkan pula beberapa hasil simulasi awal yang diterapkan untuk gambar dengan metode MEF ini. Hasil simulasi kami menunjukkan bahwa penggunaan metode yang kami lakukan cukup menjanjikan.

## Bibliografi

- [1] Philippe Hanhart, Marco V. Bernardo, Manuela Pereira, António M. G. Pinheiro, and Touradj Ebrahimi. Benchmarking of objective quality metrics for HDR image quality assessment. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 39(13640):1–18, December 2015. ISSN 1687-5281. doi: 10.1186/s13640-015-0091-4. URL <https://jivp-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13640-015-0091-4>.
- [2] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta Pattanaik, and Paul Debevec. *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2005. ISBN 0125852630.
- [3] Alan Chalmers and Kurt Debattista. HDR video past, present and future: A perspective. *Signal Processing: Image Communication*, 54:49 – 55, 2017. ISSN 0923-5965. doi: <https://doi.org/10.1016/j.image.2017.02.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092359651730019X>.
- [4] Benjamin Guthier, Kalun Ho, Stephan Kopf, and Wolfgang Effelsberg. Determining exposure values from hdr histograms for smartphone photography. In *Proceedings of the 21st ACM International Conference on Multimedia*, MM '13, pages 425–426, New York, NY, USA, 2013. ACM. ISBN 978-1-4503-2404-5. doi: 10.1145/2502081.2502252. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2502081.2502252>.
- [5] Natasha Gelfand, Andrew Adams, Sung Hee Park, and Kari Pulli. Multi-exposure imaging on mobile devices. In *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimedia*, MM '10, pages 823–826, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-60558-933-6. doi: 10.1145/1873951.1874088. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1873951.1874088>.
- [6] Oliver Wang and James Davis. Gradient domain HDR compositing. In *ACM SIGGRAPH 2011 Posters*, SIGGRAPH '11, pages 34:1–34:1, New York, NY, USA, 2011. ACM. ISBN 978-1-4503-0971-4. doi: 10.1145/2037715.2037755. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2037715.2037755>.
- [7] Wenlong Zhang, Xiaolin Liu, and Wuchao Wang. Wavelet-based multi-exposure image fusion. In *Proceedings of the 8th International Conference on Signal Processing Systems*, ICSPS 2016, pages 65–69, New York, NY, USA, 2016. ACM. ISBN 978-1-4503-4790-7. doi: 10.1145/3015166.3015199. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3015166.3015199>.



- [8] Robert Kuchar and Timo Schairer. State-of-the-art rendering techniques in real-time architectural visualization. In *ACM SIGGRAPH 2007 Posters*, SIGGRAPH '07, New York, NY, USA, 2007. ACM. ISBN 978-1-4503-1828-0. doi: 10.1145/1280720.1280854. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1280720.1280854>.
- [9] Helge Seetzen, Wolfgang Heidrich, Wolfgang Stuerzlinger, Greg Ward, Lorne Whitehead, Matthew Trentacoste, Abhijeet Ghosh, and Andrejs Vorozcovs. High dynamic range display systems. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):760–768, August 2004. ISSN 0730-0301. doi: 10.1145/1015706.1015797. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1015706.1015797>.
- [10] Erik Reinhard, Michael Stark, Peter Shirley, and James Ferwerda. Photographic tone reproduction for digital images. *ACM Trans. Graph.*, 21(3):267–276, July 2002. ISSN 0730-0301. doi: 10.1145/566654.566575. URL <http://doi.acm.org/10.1145/566654.566575>.
- [11] Gabriel Eilertsen, Jonas Unger, Robert Wanat, and Rafal Mantiuk. Survey and evaluation of tone mapping operators for hdr video. In *ACM SIGGRAPH 2013 Talks*, SIGGRAPH '13, pages 11:1–11:1, New York, NY, USA, 2013. ACM. ISBN 978-1-4503-2344-4. doi: 10.1145/2504459.2504473. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2504459.2504473>.
- [12] A. Artusi, R. K. Mantiuk, T. Richter, P. Korshunov, P. Hanhart, T. Ebrahimi, and M. Agostinelli. JPEG XT: A compression standard for HDR and WCG images [standards in a nutshell]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 33(2):118–124, March 2016. ISSN 1053-5888. doi: 10.1109/MSP.2015.2506199.
- [13] T. Richter. On the standardization of the jpeg xt image compression. In *2013 Picture Coding Symposium (PCS)*, pages 37–40, Dec 2013. doi: 10.1109/PCS.2013.6737677.
- [14] Seungcheol Choi, Oh-Jin Kwon, Jinhee Lee, and Youngseop Kim. A JPEG backward-compatible image coding scheme for high dynamic range images. *Digital Signal Processing*, 67:1 – 16, 2017. ISSN 1051-2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.04.007>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200417300763>.
- [15] Scott Daly. The visible differences predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity. *Proc. SPIE - Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III*, 1666:2–15, 1992.
- [16] J. Lubin. A human vision system model for objective picture quality measurements. In *Proceedings International Broadcasting Convention*, pages 498–503, Amsterdam, September 12–16 1997.

- [17] Z. Wang and A.C. Bovik. A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3):81–84, March 2002. URL <http://www.cns.nyu.edu/~zwang/>.
- [18] Zhou Wang, Ligang Lu, and Alan C. Bovik. Video quality assessment based on structural distortion measurement. *Signal Processing: Image Communication*, 19(2): 121–132, February 2004.
- [19] Pina Marziliano, Frederic Dufaux, Stefan Winkler, and Touradj Ebrahimi. A no-reference perceptual blur metric. In *Proceedings of the ICIP*, volume 3, pages 57–60, Rochester, USA, 2002. URL <http://stefan.winkler.net/>.
- [20] Irwan Prasetya Gunawan and Antony Halim. No-reference jpeg image quality assessment using haar wavelet decomposition. *ECTI Transaction On Computer and Information Technology*, 5(2):61–72, November 2011. ISSN 1905-050X. URL <https://www.tci-thaijo.org/index.php/ecticit/issue/view/5253>.
- [21] Irwan P Gunawan and Mohammed Ghanbari. Reduced-reference video quality assessment using discriminative local harmonic strength with motion consideration. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 18(1):71–83, January 2008. ISSN 1051-8215 (Print), 1558-2205 (Online). doi: 10.1109/TCSVT.2007.913755. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/4400126/>.
- [22] Irwan Prasetya Gunawan and Mohammed Ghanbari. Efficient reduced-reference video quality meter. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 54(3):669–679, September 2008. ISSN 0018-9316 (Print), 1557-9611 (Online). doi: 10.1109/TBC.2008.2000734. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/4550733/>.
- [23] Frédéric Drago, William L. Martens, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Perceptual evaluation of tone mapping operators. In *ACM SIGGRAPH 2003 Sketches & Applications*, SIGGRAPH '03, pages 1–1, New York, NY, USA, 2003. ACM. doi: 10.1145/965400.965487. URL <http://doi.acm.org/10.1145/965400.965487>.
- [24] Michael Ashikhmin and Jay Goyal. A reality check for tone-mapping operators. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 3(4):399–411, October 2006. ISSN 1544-3558. doi: 10.1145/1190036.1190040. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1190036.1190040>.
- [25] Zhongkang Lu and Susanto Rahardja. A contrast perception matching based hdr tone-mapping operator. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Posters*, SIGGRAPH ASIA '09, pages 45:1–45:1, New York, NY, USA, 2009. ACM. doi: 10.1145/1666778.1666823. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1666778.1666823>.
- [26] Patrick Ledda, Alan Chalmers, Tom Troscianko, and Helge Seetzen. Evaluation of tone mapping operators using a high dynamic range display. *ACM Trans. Graph.*,

- 24(3):640–648, July 2005. ISSN 0730-0301. doi: 10.1145/1073204.1073242. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1073204.1073242>.
- [27] Ahmet Oğuz Akyüz and Erik Reinhard. Perceptual Evaluation of Tone-reproduction Operators Using the Cornsweet–Craik–O’Brien Illusion. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 4(4):1:1–1:29, February 2008. ISSN 1544-3558. doi: 10.1145/1278760.1278761. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1278760.1278761>.
- [28] Jiangtao Kuang, Hiroshi Yamaguchi, Changmeng Liu, Garrett M. Johnson, and Mark D. Fairchild. Evaluating HDR rendering algorithms. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 4(2), July 2007. ISSN 1544-3558. doi: 10.1145/1265957.1265958. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1265957.1265958>.
- [29] Ahmet Oğuz Akyüz and Osman Kaya. A Proposed Methodology for Evaluating HDR False Color Maps. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 14(1):2:1–2:18, July 2016. ISSN 1544-3558. doi: 10.1145/2911986. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2911986>.
- [30] Alessandro Artusi, Rafal K. Mantiuk, Thomas Richter, Philippe Hanhart, Pavel Korshunov, Massimiliano Agostinelli, Arkady Ten, and Touradj Ebrahimi. Overview and evaluation of the JPEG XT HDR image compression standard. *Journal of Real-Time Image Processing*, Dec 2015. ISSN 1861-8219. doi: 10.1007/s11554-015-0547-x. URL <https://doi.org/10.1007/s11554-015-0547-x>.
- [31] Philippe Hanhart and Touradj Ebrahimi. Evaluation of JPEG XT for high dynamic range cameras. *Signal Processing: Image Communication*, 50:9 – 20, 2017. ISSN 0923-5965. doi: <https://doi.org/10.1016/j.image.2016.10.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596516301552>.
- [32] Rafat Mantiuk, Kil Joong Kim, Allan G. Rempel, and Wolfgang Heidrich. HDR-VDP-2: A calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions. *ACM Trans. Graph.*, 30(4):40:1–40:14, July 2011. ISSN 0730-0301. doi: 10.1145/2010324.1964935. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2010324.1964935>.
- [33] H. Yeganeh and Z. Wang. Objective quality assessment of tone-mapped images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(2):657–667, Feb 2013. ISSN 1057-7149. doi: 10.1109/TIP.2012.2221725.
- [34] Manish Narwaria, Matthieu Perreira Da Silva, and Patrick Le Callet. HDR-VQM: An objective quality measure for high dynamic range video. *Signal Processing: Image Communication*, 35:46–60, July 2015. ISSN 0923-5965. doi: 10.1016/j.image.2015.04.009. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596515000703?via%3Dihub>.

- [35] Tunc Ozan Aydin, Rafał Mantiuk, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Dynamic range independent image quality assessment. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(3), August 2008. ISSN 0730-0301. doi: 10.1145/1360612.1360668. URL <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1360668>. Article No. 69.
- [36] Debarati Kundu. *Subjective and Objective Quality Evaluation of Synthetic and High Dynamic Range Images*. phdthesis, Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin, Main Building (MAI) 110 Inner Campus Drive Austin, TX 78705, May 2016. Supervisor: Brian L. Evans.
- [37] S. Jia, Y. Zhang, D. Agrafiotis, and D. Bull. Blind high dynamic range image quality assessment using deep learning. In *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 765–769, Sept 2017. doi: 10.1109/ICIP.2017.8296384.
- [38] Feifan Guan, Gangyi Jiang, Yang Song, Mei Yu, Zongju Peng, and Fen Chen. No-reference high-dynamic-range image quality assessment based on tensor decomposition and manifold learning. *Applied Optics*, 57:839, 02 2018.
- [39] K. Ma, K. Zeng, and Z. Wang. Perceptual quality assessment for multi-exposure image fusion. *IEEE Transactions on Image Processing*, 24(11):3345–3356, Nov 2015. ISSN 1057-7149. doi: 10.1109/TIP.2015.2442920.
- [40] D. Kundu, D. Ghadiyaram, A. C. Bovik, and B. L. Evans. No-reference quality assessment of tone-mapped hdr pictures. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(6):2957–2971, June 2017. ISSN 1057-7149. doi: 10.1109/TIP.2017.2685941.
- [41] A. Rovid, A. R. Varkonyi-Koczy, T. Hashimoto, S. Balogh, and Y. Shimodaira. Gradient based synthesized multiple exposure time hdr image. In *2007 IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference IMTC 2007*, pages 1–6, May 2007. doi: 10.1109/IMTC.2007.379132.
- [42] A. R. Varkonyi-Koczy, A. Rovid, and T. Hashimoto. Gradient-based synthesized multiple exposure time color hdr image. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(8):1779–1785, Aug 2008. ISSN 0018-9456. doi: 10.1109/TIM.2008.925715.
- [43] Bo Gu, Wujing Li, Jiangtao Wong, Minyun Zhu, and Minghui Wang. Gradient field multi-exposure images fusion for high dynamic range image visualization. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 23(4):604–610, 2012.
- [44] Zheng Guo Li, Jing Hong Zheng, and Susanto Rahardja. Detail-enhanced exposure fusion. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(11):4672–4676, 2012.

- [45] Mingli Song, Dacheng Tao, Chun Chen, Jiajun Bu, Jiebo Luo, and Chengqi Zhang. Probabilistic exposure fusion. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(1):341–357, 2012.
- [46] Rui Shen, Irene Cheng, and Anup Basu. Qoe-based multi-exposure fusion in hierarchical multivariate gaussian crf. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(6):2469–2478, 2013.
- [47] A Ardeshir Goshtasby. Fusion of multi-exposure images. *Image and Vision Computing*, 23(6):611–618, 2005.
- [48] T. Mertens, J. Kautz, and F. Van Reeth. Exposure fusion: A simple and practical alternative to high dynamic range photography. *Computer Graphics Forum*, 28(1):161–171, 2009.
- [49] Se-Hwan Yun, Tae-Chan Kim, and Jin Heon Kim. Single exposure-based image fusion using multi-transformation. In *Consumer Electronics (GCCE), 2012 IEEE 1st Global Conference on*, pages 142–143. IEEE, 2012.
- [50] Fan Huang, Dongming Zhou, Rencan Nie, and Chuanbo Yu. A color multi-exposure image fusion approach using structural patch decomposition. *IEEE Access*, 6:42877–42885, 2018.
- [51] Yuman Kinoshita, Sayaka Shiota, Hitoshi Kiya, and Taichi Yoshida. Multi-exposure image fusion based on exposure compensation. In *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pages 1388–1392. IEEE, 2018.
- [52] Peter J Burt. The pyramid as a structure for efficient computation. In *Multiresolution image processing and analysis*, pages 6–35. Springer, 1984.
- [53] Wei Zhang and Wai-Kuen Cham. Gradient-directed multiexposure composition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(4):2318–2323, 2012.
- [54] Kai Zeng, Kede Ma, Rania Hassen, and Zhou Wang. Perceptual evaluation of multi-exposure image fusion algorithms. In *Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2014 Sixth International Workshop on*, pages 7–12. IEEE, 2014.
- [55] Maryam Azimi, Ronan Boitard, Basak Oztas, Stelios Ploumis, Hamid Reza Tohidpour, Mahsa T Pourazad, and Panos Nasiopoulos. Compression efficiency of hdr/ldr content. In *Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2015 Seventh International Workshop on*, pages 1–6. IEEE, 2015. doi: 10.1109/QoMEX.2015.7148154.

- [56] Ayyoub Ahar, Saeed Mahmoudpour, Glenn Van Wallendael, Tom Paridaens, Peter Lambert, and Peter Schelkens. A Just Noticeable Difference Subjective Test for High Dynamic Range Images. In *2018 Tenth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [57] Erik Reinhard, Wolfgang Heidrich, Paul Debevec, Sumanta Pattanaik, Greg Ward, and Karol Myszkowski. *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.
- [58] Vladimir S Petrovic and Costas S Xydeas. Gradient-based multiresolution image fusion. *IEEE Transactions on Image processing*, 13(2):228–237, 2004.
- [59] Gemma Piella. Image fusion for enhanced visualization: A variational approach. *International Journal of Computer Vision*, 83(1):1–11, 2009.
- [60] Shutao Li and Xudong Kang. Fast multi-exposure image fusion with median filter and recursive filter. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 58(2), 2012.
- [61] A. Artusi, T. Richter, T. Ebrahimi, and R. K. Mantiuk. High dynamic range imaging technology [lecture notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(5):165–172, Sept 2017. ISSN 1053-5888. doi: 10.1109/MSP.2017.2716957.
- [62] Damon M. Chandler, Md Mushfiqul Alam, and Thien D. Phan. Seven challenges for image quality research. In Bernice E. Rogowitz, Thrasyvoulos N. Pappas, and Huib de Ridder, editors, *SPIE Proceedings: Human Vision and Electronic Imaging XIX*, volume 9014, February 2014. doi: 10.1117/12.2047117.
- [63] Hamid Rahim Sheikh, Alan C. Bovik, Lawrence Cormack, and Zhou Wang. LIVE Image Quality Assessment Database, 2004. URL <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [64] Mark Fairchild’s HDR Photographic Survey, 2006-2007. URL <http://rit-mcsl.org/fairchild/HDR.html>.
- [65] Manish Narwaria, Matthieu Perreira Da Silva, and Patrick Le Callet. Hdr-vqm: An objective quality measure for high dynamic range video. *Signal Processing: Image Communication*, 35:46–60, 2015.
- [66] H. Yeganeh and Z. Wang. Objective quality assessment of tone-mapped images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(2):657–667, Feb 2013. ISSN 1057-7149. doi: 10.1109/TIP.2012.2221725.
- [67] Tunç Ozan Aydin, Rafał Mantiuk, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel. Dynamic range independent image quality assessment. *ACM Trans. Graph.*, 27(3):69:1–69:10,

August 2008. ISSN 0730-0301. doi: 10.1145/1360612.1360668. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1360612.1360668>.

- [68] S. Jia, Y. Zhang, D. Agrafiotis, and D. Bull. Blind high dynamic range image quality assessment using deep learning. In *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 765–769. IEEE, Sept 2017. doi: 10.1109/ICIP.2017.8296384.