

Mismatch Negativity (MMN): Komponen Event-Related Potentials (ERP) sebagai Penanda Aktivitas Otomatis Otak dalam Mendeteksi Perubahan

Mismatch Negativity (MMN): Brain's Event-Related Potentials (ERP) Marker for Automatic Change Detection

Zulfikri Khakim^{*1}, Ferenc Honbolygó²

¹*Computational and Cognitive Neuroscience Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary.*

²*Brain Imaging Centre, Research Centre for Natural Sciences, Budapest, Hungary*

Naskah masuk 29 April 2022 Naskah diterima 13 Agustus 2022 Naskah diterbitkan 23 Desember 2022

Abstrak. Agar dapat berinteraksi secara efisien terhadap banyaknya informasi sensori, otak memiliki strategi heuristik yang dapat menyaring informasi sekaligus mengarahkan atensi ketika muncul informasi yang penting dan krusial. Penelitian tentang otak telah mengungkapkan salah satu penanda atas sistem tersebut, yang disebut sebagai *Mismatch Negativity* (MMN). MMN merupakan salah satu komponen dari *Event-Related brain Potentials* (ERP) yang diasosiasikan dengan penanda sistem pendeteksi perubahan dan pelanggaran tiba-tiba terhadap aturan abstrak dari stimulus suara, dan dapat digunakan sebagai indikator objektif mengenai akurasi diskriminasi suara, sensori memori, maupun proses praatensi. Komponen MMN muncul sebagai gelombang negatif yang terpicu oleh stimulus yang menyimpang dari keteraturan. Metode MMN telah banyak digunakan dalam berbagai bidang penelitian hingga konteks klinis. MMN juga merupakan metode yang sangat bermanfaat untuk menyelidiki mekanisme pemrosesan kognitif pada populasi yang memiliki kesulitan untuk mengikuti prosedur eksperimen, misalnya pada anak-anak, atau pasien klinis karena sifatnya yang otomatis dan tidak membutuhkan atensi. Artikel ini merupakan kajian literatur yang bertujuan untuk memberikan pengenalan mengenai konsep dan prinsip dasar dalam MMN, paradigma eksperimen, hingga contoh aplikasi, dan potensi penelitian yang dapat dilakukan menggunakan metode ini.

Kata kunci: *event-related potentials*; elektroensefalografi; *mismatch negativity*; psikologi; penanda neural; kognisi

Abstract. In order to interact efficiently with the continuous stream of sensory information, the brain utilizes a heuristic strategy that can filter out background information and direct attention when important and crucial information emerges. Brain research has revealed such a marker for this system, known as Mismatch Negativity (MMN). MMN is one of the components of Event-Related brain Potentials (ERP) which is associated with change detection's marker and violations of abstract rules established by a sequence of auditory stimuli and can be used as an objective indicator of the accuracy of sound discrimination, sensory memory, and pre-attentive processes. The MMN component appears as negative deflection that is triggered by a stimulus that deviates from the regularity. The MMN method has been widely used in various research fields to clinical contexts. Because of its automatic mechanism, the MMN is also an indispensable tool to study the processing mechanisms in populations where overt behavioral responses are difficult to elicit, for example in infants or certain clinical patients. This article is a literature review which aims to introduce the basic concepts and principles in MMN, its experimental paradigm, and examples of applications and potential research that can be conducted using this method.

Keywords: cognition; event-related potentials; electroencephalography; mismatch; psychology; negativity; neural marker

Pengantar

Berinteraksi dengan lingkungan sehari-hari membutuhkan pemrosesan informasi yang sangat kompleks. Setiap waktu, sensor di tubuh organisme mendapatkan aliran informasi secara konstan. Sebagian dari informasi tersebut sangat krusial dalam bertahan hidup. Namun, sebagian besar informasi dari sensori tersebut merupakan latar belakang yang tidak relevan dan mengancam. Sebagai contoh, ketika kita berkendara, pemroses suara di otak secara konstan mendapatkan stimulasi seperti suara mesin kendaraan maupun suara lingkungan yang umumnya bisa diabaikan. Namun, dalam kondisi tertentu ada suara klakson dari kendaraan lain yang merupakan sebuah informasi yang berpotensi mengancam. Dalam kondisi tersebut, otak perlu memiliki strategi otomatis agar dapat menyaring informasi yang bisa diabaikan (contohnya suara mesin kendaraan) dan informasi yang menuntut atensi secara cepat (contohnya suara klakson dari kendaraan lain). Mekanisme ini dibutuhkan untuk meminimalisasi pemrosesan informasi oleh otak, menghemat energi, sekaligus tetap waspada terhadap informasi yang relevan (Näätänen & Kreegipuu, 2011). Penelitian dalam bidang sains kognitif dan neurosains telah mengungkap adanya mekanisme tersebut dan apa penanda neural-nya (*neural marker*), salah satunya adalah yang disebut dengan *Mismatch Negativity* (MMN).

MMN diobservasi dari pengukuran elektrofisiologis otak melalui elektroensefalografi (EEG) atau *magnetoensefalografi* (MEG). MMN merupakan salah satu komponen dalam *Event-related Potential* (ERP), yaitu metode pengukuran potensial listrik otak yang muncul sebagai efek langsung dari sebuah *event*. MMN merupakan salah satu komponen ERP yang paling banyak diteliti di bidang sains kognitif, psikologi, maupun neurosains (Kappenman *et al.*, 2021). MMN juga telah diteliti dengan menggunakan berbagai metode *brain imaging* lainnya, seperti *functional Magnetic Resonance Imaging* (fMRI) untuk melihat sumber aktivasi mekanismenya (Kujala *et al.*, 2010; Näätänen & Kreegipuu, 2011).

MMN termanifestasi ketika sebuah stimulus suara yang menonjol berbeda muncul secara tiba-tiba di antara stimulus suara yang telah diberikan secara terus menerus sebelumnya. Ketika sebuah stimulus suara dipresentasikan secara berulang-ulang, menyimulasikan informasi dari lingkungan yang reguler (seperti pada contoh suara mesin kendaraan) otak membangun sebuah representasi jejak memori tentang suara tersebut. Apabila selama jejak memori aktif kemudian sebuah suara yang berbeda disajikan (contohnya suara klakson), maka informasi yang baru akan menimbulkan konflik dengan jejak memori. Konflik tersebut akan termanifestasi pada gelombang otak yang dapat diukur dengan metode ERP. Dalam kondisi konflik ini diasumsikan bahwa otak mengaktifkan respons siaga dan mengorientasikan perhatian (Fitzgerald & Todd, 2020; Garrido *et al.*, 2009; Näätänen & Kreegipuu, 2011).

MMN merupakan indeks objektif terhadap kemampuan akurasi individu dalam mendiskriminasi suara maupun sebagai penanda untuk sensori memori (Jaaskelainen *et al.*, 1999; Näätänen *et al.*, 2005; Sams *et al.*, 1993; Winkler *et al.*, 1993), *attention switching* (Squires *et al.*, 1975; Sussman *et al.*, 2003), pemrosesan bahasa (Honbolygó *et al.*, 2020; Kostilainen *et al.*, 2018; Kotzor *et al.*,

*Alamat Korespondensi: zulfikrihakim@gmail.com

2017), hingga musik (Kliuchko *et al.*, 2019; Vuust *et al.*, 2011). MMN telah digunakan dalam konteks klinis seperti skizofrenia (Jarkiewicz & Wichniak, 2015; Koshiyama *et al.*, 2020), *dyslexia* (Baldeweg *et al.*, 1999; Korne *et al.*, 1998), pada pasien koma dan dapat digunakan untuk memprediksi siuan (Fischer *et al.*, 2006), berbagai kondisi gangguan pendengaran (Engstrom *et al.*, 2021; Fernandes *et al.*, 2019; Kliuchko *et al.*, 2016), gangguan *mood* (Bissonnette *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020), hingga pasien sakit kronis (Fan *et al.*, 2018).

Artikel ini bertujuan untuk memberikan pengenalan prinsip dasar dan paradigma eksperimen MMN, sehingga dapat menjadi rujukan bagi pembaca ketika menemukan sebuah publikasi dengan metode MMN (atau ERP secara umum) untuk dapat membantu memahami konteks yang lebih besar dan dasar asumsi dari pengukuran tersebut. Artikel juga ditujukan untuk mengenalkan contoh-contoh penelitian yang telah dan bisa dilakukan sehingga pembaca bisa menemukan inspirasi dan titik pangkal eksplorasi untuk mendesain eksperimen berdasarkan parameter yang diminati. Saat ini penelitian dalam ranah psikologi di Indonesia yang menggunakan metode ini, atau pengukuran gelombang otak secara umum, masih sangat terbatas. Aplikasi metode MMN sangat luas dan dapat digunakan dalam berbagai konteks selama sesuai dengan keterbatasan desain eksperimen dan implikasi kesimpulannya.

Bagian awal pembahasan akan memberikan penjelasan singkat tentang ERP dan metode pengukuran gelombang otak dengan EEG. Pembahasan lebih mendalam mengenai teknik EEG dan/atau ERP dapat ditemukan dalam Luck (2014) atau Luck dan Kappenman (2011), ulasan berbahasa Indonesia dapat ditemukan di Khakim dan Kusrohmaniah (2021). Ulasan mengenai MMN secara lebih mendetail dan tingkat lanjut dapat ditemukan di berbagai publikasi (Doering *et al.*, 2015; Fitzgerald & Todd, 2020; Garrido *et al.*, 2009; Kujala *et al.*, 2007; Näätänen & Kreegipuu, 2011).

Metode

Artikel ini ditulis berdasarkan kajian literatur publikasi-publikasi sebelumnya mengenai MMN. Pencarian naskah publikasi MMN dilakukan pada basis data PubMed (pubmed.ncbi.nlm.nih.gov) dengan menggunakan kata kunci (*'Mismatch Negativity'*). Mengingat tujuan dari artikel terkait aplikasi dan potensi penelitian MMN adalah sekedar untuk memberikan contoh penelitian terbaru maka pemilihan jurnal tidak dilakukan secara sistematis, namun berdasarkan contoh-contoh terbaru yang representatif terhadap topik-topik yang diusung oleh penulis. Beberapa topik yang menjadi fokus antara lain: musik, bahasa, diskriminasi suara, atensi, *social cognition*, dan klinis.

Pembahasan

Penjelasan Singkat Event-related Potentials (ERP)

Event-related potentials (ERP) merupakan potensial listrik yang diproduksi oleh otak sebagai respons langsung terhadap *event* spesifik (Luck, 2012, 2014; Luck & Kappenman, 2011). Teknik

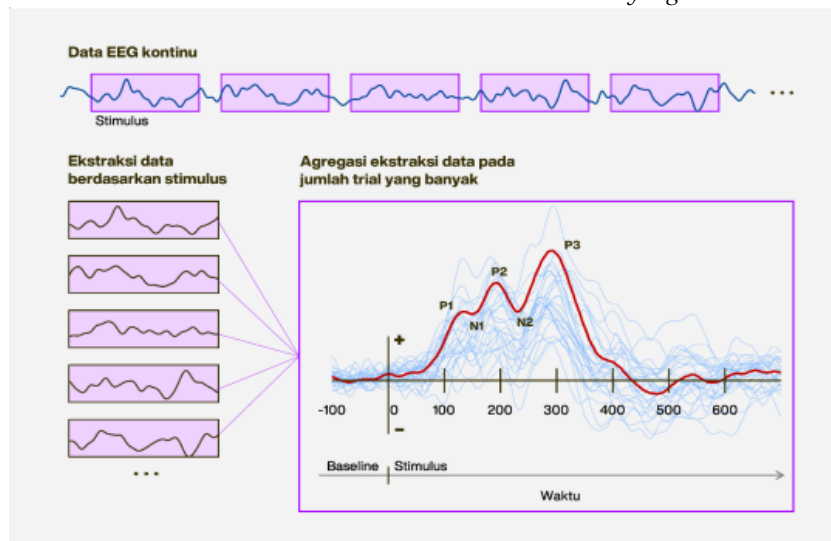
pengukuran ERP merupakan salah satu pendekatan dalam menganalisis data EEG yang disebut dengan *time-domain*, yaitu menyelidiki karakteristik data dengan kalkulasi berdasarkan waktu (Hjorth, 1970).

Data EEG diekstrak pada jendela waktu yang spesifik yang ditentukan berdasarkan *event* yang ditentukan, misalnya kemunculan stimulus (*stimulus-locked ERP*) atau respons (*response-locked ERP*). Sebagai contoh, stimulus gambar ditayangkan kepada partisipan selama data EEG direkam, kemudian data EEG tersebut diekstrak pada jendela waktu 100 mili detik (ms) sebelum kemunculan gambar, hingga 500 ms setelah kemunculan gambar menjadi potongan data (umumnya disebut *epoch*) gelombang selama 600 ms. Kemudian *epoch* diagregasikan dalam jumlah yang banyak (sesuai dengan jumlah *trial*) untuk mendapatkan rerata gelombang otak yang diasumsikan merupakan aktivitas spesifik terhadap stimulus gambar tersebut. Perhatikan Gambar 1 yang mengilustrasikan proses tersebut.

Agregasi dari data kemudian akan mengungkap pola laten dalam gelombang otak, sementara gelombang acak akan saling membatalkan dan berkurang (Luck, 2014; Luck & Kappenman, 2011). ERP memberikan indeks pengukuran langsung terhadap respons otak dalam resolusi temporal hingga milidetik, dan juga memungkinkan peneliti untuk mengisolasi proses operasi neuro-kognitif yang muncul sebagai respons dari perlakuan (Kappenman *et al.*, 2021).

Gambar 1

Ilustrasi Proses Analisis Data EEG Secara Time-Domain yang disebut ERP



Keterangan. Data kontinu dipotong berdasarkan *event* tertentu, kemudian agregasi pada jumlah yang banyak (garis tipis biru) untuk mengungkap komponen laten (garis tebal merah). Gambar terinspirasi dari Luck (2014), dikreasikan ulang dengan menggunakan data dari penulis.

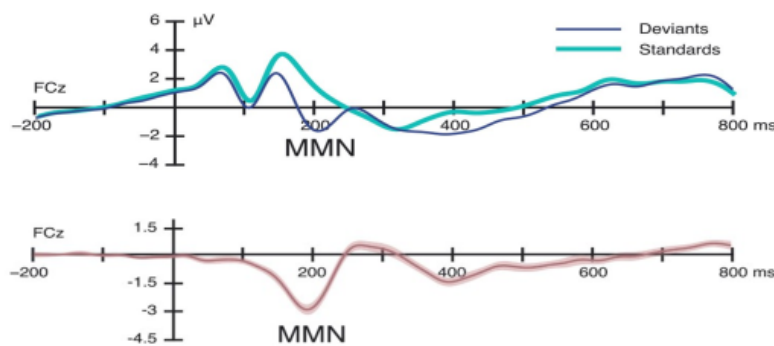
Pola laten (selanjutnya akan disebut komponen) termanifestasi sebagai puncak gelombang dengan amplitudo (tinggi gelombang) dan waktu kemunculan yang bervariasi (Luck, 2014). Puncak gelombang di dalam nomenklatur ERP diberi label berdasarkan urutan dan arah gelombangnya. Label

P1 digunakan merujuk pada puncak gelombang *positif pertama*, N1 untuk puncak *negatif pertama*, diikuti dengan P2, N2, dan seterusnya. Pembaca juga akan menemukan sistem pemberian label yang berbeda, misalnya P300, N400, N170, dan seterusnya. Label tersebut merujuk pada *arah amplitudo* dan *waktu kemunculan puncaknya*. Sebagai contoh, N170 merupakan gelombang *negatif* yang memuncak pada *waktu ~170 ms* setelah kemunculan stimulus berupa gambar wajah (Bötzel *et al.*, 1995; Eimer, 2011). Puncak gelombang ERP pada dasarnya *bukan* merupakan komponennya, melainkan *manifestasi* dari komponen yang laten dan saling bercampur baur dengan proses yang lain lebih detail lihat di (Luck, 2014).

MMN merupakan komponen negatif pada ERP yang muncul sebagai hasil dari perubahan stimulus suara di antara stimulasi auditori yang repetitif. Di dalam konteks ERP, MMN terobservasi sebagai defleksi (penyimpangan arah) negatif setelah adanya stimulus yang menyimpang dari keteraturan. Sebagai contoh partisipan diberikan stimulus suara pendek secara repetitif, stimulus ini disebut Standard. Di antara Stimulus Standard partisipan diberi suara yang sedikit berbeda disajikan secara acak, stimulus ini disebut Deviant. Stimulus Deviant akan memicu ERP yang sedikit berbeda dari Standard berupa amplitudo yang lebih negatif. Defleksi negatif tersebut adalah manifestasi dari komponen MMN. Lihat contoh gelombang MMN pada Gambar 2, bagian atas memperlihatkan dua gelombang dari Stimulus Standard dan Deviant, bagian bawah adalah gelombang selisih.

Gambar 2

Gelombang ERP yang Dipicu oleh Paradigma MMN



Keterangan. (Atas) Gelombang ERP yang muncul dari Stimulus Standard dan Deviant. (Bawah) Gelombang selisih dari kalkulasi *Deviant Minus Standard* untuk mengisolasi MMN. Gambar cuplikan dan modifikasi dari Kappenman *et al.* (2021) (di bawah lisensi CC-BY 4.0).

Temuan-temuan Awal Mismatch Negativity

Temuan pertama MMN dipublikasikan oleh Näätänen *et al.* (1978). Stimulus audio berdurasi 31 ms berupa suara sederhana pada frekuensi 1000 Hz disajikan secara repetitif. Tugas partisipan adalah mengidentifikasi suara yang sedikit berbeda, yang mereka sebut dengan Stimulus Sinyal (dalam terminologi selanjutnya disebut Deviant). Deviant diberikan dalam dua kondisi perlakuan: intensitas

yang berbeda (70 dB; sebagai Standard; 80 dB sebagai Deviant), atau frekuensi berbeda (1140 Hz sebagai Deviant). Hasil yang menarik ditemukan dari analisis tambahan ketika mereka menghitung selisih dengan kalkulasi gelombang Deviant minus Standard. Näätänen *et al.* (1978) menyadari adanya efek sistematis berupa penyimpangan negatif oleh Stimulus Deviant. Redaman atau defleksi negatif tersebut muncul independen dari atensi partisipan, yang kemudian mereka namai *mismatch negativity*.

Näätänen *et al.* (1978) berspekulasi bahwa MMN merupakan hasil dari proses otomatis yang disebabkan oleh adanya input sensori yang menyimpang dari jejak memori yang telah terbangun dari stimulus *background*. Selanjutnya, mereka mengajukan bahwa MMN merefleksikan proses spesifik dalam mendiskriminasi stimulus. Näätänen dan Gaillard (1983) kemudian menemukan komponen negatif lain, yang dilabeli sebagai N2b yang muncul ketika partisipan memberikan atensi pada Stimulus Deviant.

Penyelidikan lebih lanjut fokus pada karakteristik dari MMN dan juga lokasinya di otak. Sams *et al.* (1985) menyelidiki lokasi sumber dari komponen MMN menggunakan SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) gradiometer yang mengukur gelombang magnetik yang diproduksi oleh aktivitas listrik otak (MEG) (Cohen, 1972; Marhl *et al.*, 2022; Singh, 2014). Kelebihannya dibandingkan EEG yaitu peneliti dapat melakukan analisis sumber secara lebih akurat (Singh, 2014). Sams *et al.* (1985) berkesimpulan bahwa MMN bersumber dari *supratemporal plane* di sekitar korteks auditori primer. Lokasi tersebut dikonfirmasi pada penelitian oleh Csépe *et al.* (1987) yang menyelidiki MMN pada kucing dan melakukan perekaman intrakranial (elektroda ditanam ke otak melalui pembedahan). Hasil tersebut memberikan bukti pertama respons MMN pada hewan non-manusia, yang menunjukkan bahwa proses MMN merupakan mekanisme fundamental otak. Alho *et al.* (1990) mengukur MMN pada bayi yang sedang tertidur. Penelitian tersebut menemukan pola MMN yang sama dengan yang ditemukan pada otak dewasa, mengonfirmasi dugaan bahwa MMN merupakan proses otomatis otak dan dapat diobservasi bahkan dalam keadaan tidur.

Paradigma Eksperimen MMN

Berbagai modifikasi terhadap metode eksperimen telah diuji untuk menginvestigasi karakteristik MMN dan faktor-faktor yang memengaruhinya. Selain itu MMN juga telah diuji dengan menggunakan stimulus yang lebih kompleks dan abstrak, hingga melalui stimulasi modalitas sensori yang lain. Dewasa ini terdapat upaya dalam menggunakan stimulus dari modalitas lain, misalnya visual (vMMN), bagian ini akan fokus pada paradigma MMN yang telah mapan, yaitu dengan stimulus suara.

Pada kondisi eksperimen MMN yang tipikal, stimulus Standard diberikan secara repetitif kepada partisipan. Contohnya suara nada sederhana dengan intensitas 80 dB, sementara partisipan diberikan tugas lain, misalnya menonton video tanpa suara atau membaca. Di antara Stimulus Standard, Stimulus Deviant yang berbeda secara karakteristik (misalnya 70 dB) terkadang disajikan dengan 20% probabilitas kemunculan. Mempresentasikan Stimulus Deviant di antara Standard disebut dengan *oddball paradigm* (Squires *et al.*, 1975), lihat Gambar 3. *Oddball paradigm* juga digunakan dalam penelitian ERP untuk mendapatkan komponen P300 (Luck *et al.*, 2009). Gelombang ERP yang

muncul dari Stimulus Deviant akan menunjukkan komponen negatif yang umumnya memuncak pada N1 dan terlihat hingga tumpang tindih dengan P2 (Näätänen & Kreegipuu, 2011) perhatikan kembali Gambar 2 (atas).

Gambar 3
 Ilustrasi Presentasi Stimulus dengan Oddball Paradigm



Terdapat beragam faktor yang berimbas pada kemunculan dan bentuk dari MMN yang dapat diobservasi. Pertimbangan pertama dalam metode MMN adalah stimulus suara apa yang digunakan. Hal ini tentunya sangat bergantung pada konstruk apa yang diinvestigasi. Stimulus sederhana umumnya digunakan dalam penelitian yang menginvestigasi proses dasar seperti atensi dan diskriminasi. Stimulus yang lebih kompleks digunakan untuk konstruk yang melibatkan pemrosesan kognitif lebih tinggi, misalnya suara ucap, suara alami, hingga musik. Selain stimulus yang digunakan, kemunculan dari stimulus tersebut juga memiliki peran penting.

Kemunculan stimulus kemudian menjadi pertimbangan selanjutnya, terutama terkait seberapa besar probabilitas kemunculan Stimulus Deviant. Perhatikan kembali mengenai *oddball paradigm*, Stimulus Deviant akan diberikan secara lebih jarang di antara Stimulus Standard yang disajikan berulang-ulang. Amplitudo MMN dipengaruhi oleh seberapa sering atau jarang Stimulus Deviant (Näätänen & Kreegipuu, 2011; Sabri & Campbell, 2001; Sato *et al.*, 2000).

MMN akan dapat diobservasi ketika probabilitas Deviant lebih rendah dari 30% (Fitzgerald & Todd, 2020; Kujala *et al.*, 2007). Probabilitas kemunculan Deviant umumnya bervariasi pada rentang 10-30%. Semakin kecil kemungkinan Deviant muncul semakin besar amplitudo MMN yang terobservasi. Sato *et al.* (2000) telah menguji probabilitas Deviant pada 5-,10-,20-, dan 30% kemunculan. Amplitudo MMN tertinggi didapatkan di area frontal pada kondisi dengan probabilitas terendah yaitu 5% dan semakin menurun dengan tingkat probabilitas. Selain probabilitas kemunculan Deviant, faktor lain terkait stimulus yang juga sangat krusial adalah jumlah berapa kali stimulus tersebut dipresentasikan (*trial*).

Komponen ERP bersifat laten dan tertutup oleh fluktuasi gelombang otak acak sehingga stimulus harus diberikan dalam jumlah yang banyak (Luck, 2014). Jumlah *trial* merupakan faktor yang sangat penting karena akan berpengaruh pada magnitudo komponen yang dapat diobservasi. Jumlah *trial* perlu mempertimbangkan jumlah partisipan, *power* dari efek perlakuan, serta variasi

karakteristik dasar antar individu (Luck, 2014). Sebagai contoh pada penelitian Honbolygó *et al.* (2020) *trial* diberikan sejumlah 666 kali per blok dengan 100 di antaranya merupakan Stimulus Deviant (15% kemunculan di antara 566 Standard). Doering *et al.* (2015) menyimpulkan bahwa pada mayoritas penelitian MMN tentang durasi jejak memori, jumlah *trial* yang diberikan adalah lebih dari 2000. Penentuan jumlah juga bisa mengacu pada penelitian referensi.

Selain jumlahnya, urutan kemunculan *trial* tersebut akan memiliki peran, hal ini disebabkan karena MMN bergantung pada jejak memori di otak. Penjelasan yang banyak diterima tentang mengapa paradigma ini memicu MMN adalah karena terbangunnya representasi di mental oleh stimulus Standard yang kemudian berkonflik dengan Deviant (Fitzgerald & Todd, 2020; Näätänen & Kreegipuu, 2011). Hal ini selama Stimulus Deviant memiliki karakteristik yang dapat dibedakan melebihi ambang batas kemampuan diskriminasi partisipan (Näätänen & Kreegipuu, 2011). Stimulus Standard akan membangun jejak memori, yang apabila stimulus yang baru Deviant muncul selama jejak memori aktif, sistem pendeteksi perubahan akan terpicu dan termanifestasi pada MMN.

Oleh pertimbangan tersebut, Stimulus Standard umumnya akan diberikan beberapa kali sebelum menyisipkan Deviant (misalnya 15 stimulus pertama selalu Standard) pada penelitian Honbolygó *et al.* (2020) untuk membangun jejak memori (Näätänen *et al.*, 2007). Selain itu, ketika dua Deviant muncul secara berturut-turut, MMN pada Deviant kedua akan menunjukkan kekuatan MMN yang lebih rendah sehingga perlu menghindari kemunculan Deviant yang berturut-turut.

Penelitian telah dilakukan untuk menginvestigasi seberapa lama jejak memori tersebut bertahan dengan memberikan variasi perlakuan pada jarak waktu antar satu *stimulus offset* dengan *onset stimulus* selanjutnya (*interstimulus interval*; ISI). Gandor dan Ullsperger (1992) menguji ISI dengan jarak 1-, 6-, dan 10-detik antar stimulus. Penelitian tersebut menemukan bahwa MMN tetap terobservasi pada kondisi ISI 10 detik, memberikan sugesti bahwa jejak memori, atau *echoic memory* (Winkler *et al.*, 1993), tetap bertahan hingga durasi ini. Durasi dari jejak memori juga telah ditemukan terpengaruh oleh beberapa faktor, misalnya usia (Jaaskelainen *et al.*, 1999), Alzheimer, penyalahgunaan alkohol, skizofrenia, dan gangguan bahasa (Doering *et al.*, 2015).

Selama disajikan stimulus, partisipan umumnya akan diberikan tugas yang tidak relevan dengan stimulus misalnya menonton video tanpa suara atau membaca. Salah satu alasannya adalah untuk mengontrol komponen negatif lain yang mengotori MMN yaitu N2b. N2b muncul pada Deviant ketika partisipan secara sadar memerhatikan stimulus (Näätänen & Gaillard, 1983). Memberikan distraksi pada partisipan akan membantu dalam mengontrol kemunculan komponen N2b tersebut. Hal ini justru menjadi salah satu kelebihan dari metode MMN karena tidak membutuhkan atensi dari subjek sehingga menguntungkan pada kondisi tertentu ketika atensi subjek sulit untuk dikontrol, misalnya pada anak-anak dan/atau populasi klinis (Näätänen *et al.*, 2017).

Seperti yang telah disebutkan di atas, dalam kondisi paradigma ini ERP yang dipicu oleh Stimulus Deviant akan menunjukkan gelombang yang lebih negatif ketimbang ERP dari stimulus Standard. Inspeksi visual dapat dilakukan pada agregat ERP pada keseluruhan partisipan. Gelombang negatif tersebut memuncak sekitar N1 dan terlihat tumpang tindih dengan P2. Tumpang tindihnya komponen tersebut menyebabkan MMN akan cenderung sukar dikenali, maka cara untuk

memudahkan dalam menentukan apakah terdapat kemunculan MMN adalah dengan mengisolasi komponen tersebut.

Mengisolasi komponen MMN, yang disebut dengan kalkulasi gelombang selisih (*difference wave*) didapatkan dengan cara mengurangi gelombang Standard dari gelombang Deviant (*Deviant minus Standard*). Hasil kalkulasi diasumsikan menghasilkan gelombang yang 'murni' dan terisolasi dari morfologi ERP, karena N1 dan P2 akan muncul pada kedua kondisi yang merupakan respons sensori dasar dan dari aktivitas otak lain yang saling tumpang tindih (Kappenman *et al.*, 2021; Luck, 2012, 2014).

MMN akan terlihat sebagai gelombang negatif pada gelombang selisih, perhatikan Gambar 2 (bawah). Proses tersebut dapat dilakukan ketika dua stimulus yang digunakan memiliki perbedaan karakteristik yang terkontrol. Beberapa kondisi, terdapat perbedaan durasi dan waktu kemunculan suara yang menjadikan tidak dapat dibandingkan secara langsung (contohnya suara ucap). Dalam kondisi demikian, kalkulasi dilakukan pada stimulus yang sama pada kondisi yang berbeda, misal gelombang dari stimulus-X ketika disajikan sebagai Deviant dikurangi dengan ketika diberikan sebagai Standard (X Deviant Minus X Standard). Inspeksi visual kemudian dapat dilakukan untuk melihat apakah ada kemunculan MMN berdasarkan bentuk, lokasi, dan waktu kemunculannya.

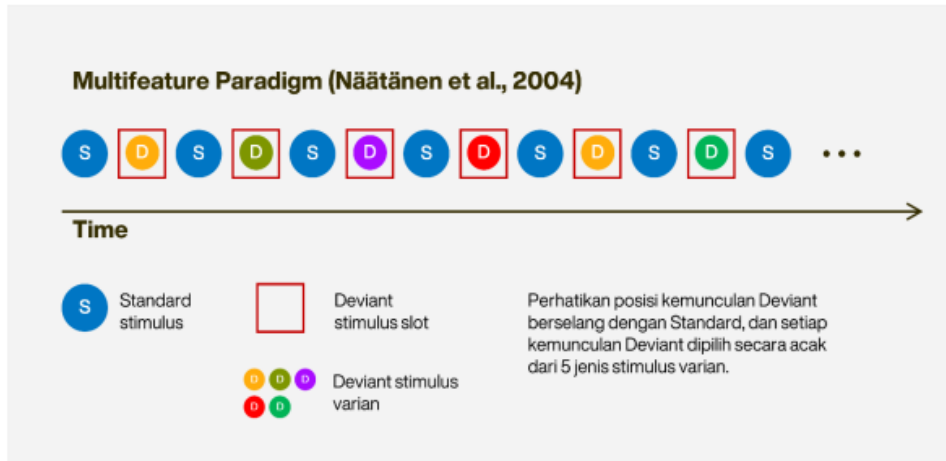
Waktu kemunculan MMN bervariasi dan sangat tergantung pada stimulus, umumnya puncak MMN dapat terlihat pada sekitar 150-250 ms setelah kemunculan stimulus. Komponen MMN umumnya berlangsung selama 100-250 ms. Puncak MMN juga tergantung pada tingkat perbedaan antara Deviant dengan Standard, semakin berbeda karakteristiknya maka akan semakin awal puncaknya (Näätänen & Kreegipuu, 2011; Tiitinen *et al.*, 1994). Secara tipologi (lokasinya di kepala) MMN terlihat di elektroda pada area frontosentral hingga sentral (Kappenman *et al.*, 2021; Näätänen & Kreegipuu, 2011) misalnya elektroda FCz dan Cz. Apabila dari inspeksi visual tersebut telah ditetapkan adanya kemunculan MMN, peneliti dapat menentukan parameter kuantitatif yang akan digunakan dalam uji statistik.

Parameter kuantitatif yang banyak digunakan dalam uji statistik adalah *rerata amplitudo* (*mean amplitude*) dan *onset puncak* (*peak latency*) MMN pada jendela waktu tertentu (Doering *et al.*, 2015). Meskipun demikian, pengukuran *onset* puncak lebih sedikit digunakan karena sensitif terhadap perbedaan mendasar pada stimulus dan juga terdapat kemungkinan eror ekstraksi yang disebabkan oleh *noise* frekuensi tinggi pada data EEG (Kappenman *et al.*, 2021). Penentuan jendela waktu yang menjadi fokus ekstraksi nilai untuk uji statistik tergantung pada stimulus yang tentunya berimbas pada bentuk ERP. Dalam proses ini, inspeksi visual dapat kembali menjadi rujukan. Inspeksi visual dapat pula dikonfirmasi melalui tes statistik, misalnya *point-by-point one-sample t-test* atau *cluster-based permutation test* (Groppe *et al.*, 2011). Ekstraksi berdasarkan jendela waktu berjenjang juga dapat dilakukan, misalnya Cummings *et al.* (2021) menggunakan jenjang waktu 100-250 ms terbagi tiap 50 ms menghasilkan rerata data pada 100-150, 150-200, dan 200-250 ms.

Hal-hal di atas adalah standar praktis dalam penelitian MMN yang telah banyak dilakukan dan terbukti reliabel dapat memicu komponen MMN. Beragam variasi dan modifikasi pada paradigma ini telah diuji. Modifikasi tersebut dapat berupa cara pemberian stimulus, yaitu dengan menggunakan

lebih dari satu stimulus sekaligus, yang disebut *multifeature paradigm* (Näätänen *et al.*, 2004).

Gambar 4
Ilustrasi Paradigma Multifeature



Paradigma *multifeature* diajukan oleh Näätänen *et al.* (2004) dengan memberikan lima jenis Deviant dalam satu blok eksperimen. Paradigma penelitian MMN tradisional hanya menggunakan satu Stimulus Deviant dalam satu putaran (sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3). Näätänen *et al.* (2004) menguji paradigma yang memberikan lima jenis Deviant dan stimulus diberikan secara berselang antara Standard dengan Deviant (yaitu: SDSDSDS...) di mana setiap kemunculan Deviant merupakan salah satu dari lima secara acak Gambar 4.

Metode tersebut ternyata tetap menunjukkan amplitudo MMN yang setara dengan kondisi *oddball* standar (Näätänen *et al.*, 2004). Paradigma ini membuka potensi metodologi di mana peneliti bisa menggunakan lebih dari satu variasi Deviant dan melakukan perbandingan lima fitur secara bersamaan dalam satu kali putaran blok eksperimen. Kondisi ini tentunya membantu untuk mengurangi waktu yang dibutuhkan dalam eksperimen MMN. Memberikan lima variasi fitur secara bersamaan juga tentunya membuka potensi dengan menggunakan stimulus yang lebih kompleks. *Multifeature paradigm* telah digunakan dalam berbagai penelitian, contohnya persepsi terhadap suara ucap/bahasa (Honbolygó *et al.*, 2017), musik (Kliuchko *et al.*, 2019), pada bayi atau anak-anak (Kostilainen *et al.*, 2018), hingga pada sampel klinis (Bissonnette *et al.*, 2020).

Pertanyaan lain mengenai MMN adalah apakah bisa dipicu dari modalitas selain auditori. Prinsip dasar MMN dirumuskan berdasarkan penelitian menggunakan stimulus suara. Beberapa penelitian melakukan investigasi pada komponen yang mirip dengan MMN dengan menggunakan stimulus visual berupa gambar (Alho *et al.*, 1992; Alvarez *et al.*, 2003; Kremláček *et al.*, 2006; Stefanics *et al.*, 2014) maupun somatosensori berupa sentuhan pada kulit (Akatsuka *et al.*, 2005; He *et al.*, 2020; Kekoni *et al.*, 1997; Shen *et al.*, 2018; Spackman *et al.*, 2010; Strömmer *et al.*, 2014).

Berbeda dengan MMN dari stimulus suara, eksperimen visual MMN (vMMN) memiliki tantangan tambahan, yaitu bagaimana mengontrol atensi partisipan untuk menghindari komponen

atensi pada gelombang ERP yang ternyata lebih sulit dilakukan pada stimulus visual (Alvarez *et al.*, 2003; Stefanics *et al.*, 2014). Meskipun temuan-temuan vMMN menunjukkan hasil yang tidak lebih reliabel daripada MMN, beberapa tinjauan pustaka (Alvarez *et al.*, 2003; Kremláček *et al.*, 2016; Stefanics *et al.*, 2014) mengusulkan keberadaan vMMN dan diproduksi melalui mekanisme yang sama. Sementara itu, untuk somatosensori MMN (sMMN) belum terdapat banyak kesimpulan karena sedikitnya penelitian. Namun terdapat ajuan bahwa komponen ini bisa didapatkan secara reliabel pada subjek dewasa (He *et al.*, 2020; Spackman *et al.*, 2010) maupun anak-anak (Shen *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2018).

Mekanisme yang Mendasari MMN

Pertanyaan paling fundamental adalah apakah redaman gelombang ERP yang menjadi karakteristik dari MMN merupakan hasil dari proses kognitif atau hanya akibat langsung dari perbedaan karakteristik fisik pada stimulus. Untuk dapat mengobservasi MMN, Stimulus Deviant harus memiliki karakteristik atau fitur yang berbeda (Näätänen *et al.*, 2007), tentunya menimbulkan permasalahan dalam mengidentifikasi apakah MMN mencerminkan efek pemrosesan sensori terhadap stimulus atau sebuah proses yang lebih dalam. Berbagai penelitian telah menetapkan bahwa memang MMN merupakan hasil dari mekanisme yang lebih dalam (Näätänen & Kreegipuu, 2011). Hal ini didukung oleh fakta bahwa MMN muncul ketika stimulus yang diberikan memiliki perbedaan yang abstrak, bahkan ketika Stimulus Standard terdiri atas beberapa stimulus yang bervariasi karakteristik fisiknya contoh (Houlihan & Stelmack, 2012).

Penjelasan yang paling umum adalah MMN muncul dependen terhadap jejak memori jangka pendek yang terbangun oleh Stimulus Standard yang repetitif (Fitzgerald & Todd, 2020; Garrido *et al.*, 2009; Näätänen & Kreegipuu, 2011; Näätänen *et al.*, 2007). Pelanggaran pada regularitas stimulus oleh Deviant memicu sistem perbandingan pada informasi sensori yang baru dengan jejak memori yang ada. MMN merupakan penanda dari deteksi perubahan otomatis yang aktif dari sensori memori bahkan sebelum proses atensi (Fitzgerald & Todd, 2020; Garrido *et al.*, 2009; Tiitinen *et al.*, 1994). Stimulus Standard membangun model dalam jejak memori untuk menciptakan prediksi tentang kondisi lingkungan yang kemudian diperbarui ketika ada informasi baru. Merefleksikan kembali analogi pada bagian awal artikel tentang suara mesin yang reguler dengan informasi baru dari suara klakson.

Kemunculan MMN berasal dari dua area otak yang berbeda yang terdiri atas dua proses fungsional: generator temporal yang berkaitan dengan sensori memori, dan frontal yang diasosiasikan dengan proses pengalihan perhatian secara otomatis (Giard *et al.*, 1990). Frontal MMN muncul lebih lambat (Teemu *et al.*, 2000) sehingga terdapat kemungkinan bahwa mekanisme deteksi perubahan pada area ini dipicu oleh mekanisme sensori memori dari area temporal (Garrido *et al.*, 2009). Kembali ke contoh berkendara, mekanisme dari generator temporal mendeteksi ketika adanya penyimpangan stimulus (dalam hal ini suara klakson), kemudian informasi tersebut memicu generator frontal yang tampaknya berfungsi dalam memicu pengalihan atensi secara otomatis.

Jaaskelainen *et al.* (2004) memaparkan proposal alternatif bahwa MMN merupakan hasil

dari proses yang lebih sederhana yaitu *adaptasi neuronal* (Fitzgerald & Todd, 2020; Garrido *et al.*, 2009; Jaaskelainen *et al.*, 2004) yang diakibatkan respons N1 terhadap stimulus suara Standard terhambat dan tertekan yang disebabkan oleh repetisi. Hipotesis ini didukung dengan fakta semakin menurunnya aktivitas pada level neuron di korteks auditori dan semakin berkurang responsifnya setelah pemberian suara Standard berulang. Hipotesis ini ditantang oleh beberapa temuan, misalnya MMN tetap muncul meskipun Stimulus Standard selalu berubah, misalnya tangga nada yang semakin naik secara sistematis, gugatan lain lihat di ulasan (Näätänen *et al.*, 2005).

Usulan terkini mengenai mekanisme dibalik MMN adalah teori *predictive coding*. Model ini menyatakan bahwa: untuk *menyimpulkan penyebab dari input sensorik* (atau yang disebut sebagai *perceptual inference*) otak menciptakan sebuah model untuk memprediksi informasi tersebut, perbedaan antara prediksi dengan input sensorik kemudian dievaluasi untuk memperbarui model tersebut berdasarkan kesalahan prediksi (Fitzgerald & Todd, 2020; Friston, 2003; Garrido *et al.*, 2009; Kirihaara *et al.*, 2020; Winkler & Schröger, 2015). Model prediktif menyimpan informasi mengenai keteraturan dari lingkungan, dan ketika prediksi ini salah karena Stimulus Deviant, maka model ini perlu diperbarui yang kemudian proses ini termanifestasi sebagai MMN.

Model representasi prediktif secara implisit menyimpan keteraturan statistik (*statistical regularity*) yang diperoleh (dari Stimulus Standard) dan digunakan sebagai dasar deteksi perubahan pada lingkungan (Stefanics *et al.*, 2014). *Predictive coding* diformulasikan dalam kerangka model Bayesian empiris (Fitzgerald & Todd, 2020; Friston, 2005; Garrido *et al.*, 2009) dengan pertukaran informasi antar tingkat korteks yang berbeda secara hierarkis: prediksi *top-down (model prior)* dikirim ke tingkat yang lebih rendah untuk menjelaskan input dari *bottom-up (model posterior)* di mana kesalahan prediksi akan digunakan untuk mengoptimalkan model representasi *top-down* (Garrido *et al.*, 2009). Model ini menggabungkan dua hipotesis sebelumnya: model prediktif dijelaskan melalui mekanisme *biofisik* pada *level neuronal*.

Aplikasi dan Potensi Penelitian MMN

Penelitian yang mengkaji proses kognitif dan berhubungan dengan stimulasi auditori sangat diuntungkan dengan teknik MMN, misalnya pada pemrosesan suara secara umum, suara bahasa dan musik, termasuk efek pembelajaran maupun gangguan pada konteks-konteks tersebut. Tentunya aplikasi MMN tidak terbatas pada konteks tersebut. MMN merupakan penanda dari proses kognitif dasar dan otomatis, oleh karena itu dapat digunakan di berbagai konteks selama sesuai dengan restriksi desain penelitiannya dan implikasi kesimpulannya. Selain kemunculannya, absennya MMN pun dapat menjadi indikator penting mengenai proses mental terkait.

Secara umum MMN digunakan sebagai indeks untuk akurasi dan kemampuan mendiskriminasi suara. Beberapa contoh penelitian di antaranya: pada individu dengan *implan koklea* (Engstrom *et al.*, 2021; Fernandes *et al.*, 2019; Näätänen *et al.*, 2017), kemampuan diskriminasi pada suara ucap dari bahasa asing (Plumridge *et al.*, 2020), pengaruh beban mental pada kondisi simulasi penerbangan (Wanyan *et al.*, 2018), diskriminasi suara ucap pada anak-anak dan kaitannya dengan kemampuan kognitif (Kuuluvainen *et al.*, 2016).

MMN juga digunakan sebagai indeks dari atensi. Misalnya pada kondisi meditasi *mindfulness* (Fucci *et al.*, 2018) tapi lihat (Fucci *et al.*, 2022), stimulus suara berupa nama partisipan sendiri (Deng *et al.*, 2021), pengaruh *mood* yang diinduksi melalui musik terhadap atensi (Putkinen *et al.*, 2017), penurunan performa atensi pada individu yang banyak terpapar oleh suara bising (Wang *et al.*, 2022), pengaruh dari beban kognitif (He *et al.*, 2021), penelitian longitudinal tentang atensi pada individu yang mengalami *burnout* (Pakarinen *et al.*, 2021), hingga pengaruh dari kepribadian impulsif (Franken *et al.*, 2005).

MMN telah digunakan pada ranah penelitian kognisi sosial. Beberapa contoh: terhadap perubahan ekspresi suara orang lain dibandingkan suara diri sendiri (Rachman *et al.*, 2019), respons terhadap suara emosional (C. Chen *et al.*, 2018) pada bayi (Kostilainen *et al.*, 2018), dan individu dengan spektrum autisme (Lindström *et al.*, 2018), suara dari lawan jenis (Casado & Brunellière, 2016; Thornton *et al.*, 2019). Sebuah penelitian cukup menarik dari Petrosino *et al.* (2021) membandingkan tiga suara yang memiliki konotasi sosial: mengendus, batuk, dan kentut. Ditemukan bahwa MMN terhadap suara kentut lebih besar daripada batuk dengan mengendus, mengisyaratkan bahwa suara tersebut mengandung informasi yang secara kognitif diproses berbeda.

MMN telah digunakan pada konteks klinis, beberapa contoh di antaranya: *disleksia* (Gu & Bi, 2020), *spektrum autisme* (T. C. Chen *et al.*, 2020; Green *et al.*, 2020; Schwartz *et al.*, 2018), gangguan *mood* (Bissonnette *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020), psikosis (Donaldson *et al.*, 2021; Higgins *et al.*, 2021; Näätänen *et al.*, 2015; Yüksel *et al.*, 2021), bahkan penelitian genetik menemukan gen yang terasosiasi dengan menurunnya MMN dan diduga berhubungan dengan psikosis (Bhat *et al.*, 2021). MMN juga digunakan sebagai penanda dalam pengujian efek intervensi atau farmakoterapi, gangguan yang terkait dengan penuaan, dan konteks klinis lainnya, aplikasi MMN dalam konteks klinis lihat Kujala *et al.* (2007) atau Näätänen (2003). MMN yang dapat muncul tanpa perlunya atensi subjek juga menguntungkan pada konteks individu yang memiliki kesulitan atensi.

Musik merupakan salah satu ranah yang banyak diteliti menggunakan MMN khususnya dalam hal menyelidiki pemrosesan kognitif serta pengaruh dari pendidikan musik, misalnya: komparasi pada musisi profesional dengan amatir dan/atau non-musisi (Arndt *et al.*, 2019; Kliuchko *et al.*, 2019; Quiroga-Martinez *et al.*, 2020), deteksi error (melodik dan ritmik) stimulus musik pada musisi terlatih (Lappe *et al.*, 2016), peranan kemampuan kognitif dalam pengaruh pelatihan musik terhadap diskriminasi suara (Putkinen *et al.*, 2019; Saarikivi *et al.*, 2016), diskriminasi interval harmonis pada non-musisi (Wagner *et al.*, 2018). Beberapa penelitian terkait musik fokus pada karakteristik individu, misalnya individu dengan *congenital amusia*, tuli nada (Mathias *et al.*, 2016; Nan *et al.*, 2016), risiko depresi (Bonetti *et al.*, 2017), *absolute pitch* (Greber *et al.*, 2018), sensitivitas musisi terhadap fitur spesifik musik yang tampaknya dipengaruhi oleh genre yang dipelajari (Tervaniemi *et al.*, 2016; Vuust *et al.*, 2012).

Terdapat juga penelitian respons otak terhadap pola musik dengan interval konsonan dan disonan, di mana kemunculan MMN pada pola disonan hanya ditemukan pada individu yang memiliki pelatihan musik dan cenderung lebih lambat daripada interval konsonan, (Bojorque *et al.*, 2018) lihat juga penelitian komparatif pada monyet dan manusia tentang pemrosesan harmoni

disonan (Fishman *et al.*, 2001). Dalam kajian teori persepsi terhadap musik, interval konsonan cenderung dinilai lebih menyenangkan daripada disonan. Namun terdapat dugaan bahwa apresiasi estetika terhadap musik dipengaruhi oleh budaya, karena teori musik terutama mengenai konsonan umumnya didasarkan pada teori musik barat. Tampaknya penelitian tersebut akan menarik ketika disandingkan dengan musik gamelan yang memiliki setelan tangga nada yang berbeda dan harmoni yang cenderung disonan berdasarkan teori musik barat (Sethares, 2005), penelitian dengan pada subjek orang asli Amazon yang tidak banyak terpapar musik modern memberikan hasil yang cukup menarik (McDermott *et al.*, 2016). Pembahasan mengenai pemrosesan kognitif/emosional terhadap musik dan kaitannya dengan MMN dalam kerangka *predictive coding model* dapat ditemukan di Vuust *et al.* (2022).

Terkait penelitian tentang pemrosesan kognitif terhadap bahasa, MMN merupakan paradigma yang sangat penting dan telah menuai banyak hasil yang berpengaruh. MMN mengenai pemrosesan bahasa telah diuji pada berbagai level, mulai dari fonetik, fonemik, prosodi, hingga sintak, dan semantik (dalam hal ini peneliti juga melihat komponen lain, N400 yang berkaitan dengan pemrosesan semantik); baik pada penutur asli maupun pada konteks akuisisi bahasa. Beberapa contoh penelitian: pelanggaran sintaksis pada bahasa ibu (Hanna *et al.*, 2017; Pulvermüller & Shtyrov, 2003; Pulvermüller *et al.*, 2008), kandungan semantik emosional (Zora *et al.*, 2020), efek pelatihan bahasa (Aleksandrov *et al.*, 2019), serta informasi prosodi seperti penekanan nada suara komparatif baik antar bahasa (Garami *et al.*, 2017; Honbolygó *et al.*, 2020) maupun aksen regional (Brunellière *et al.*, 2011). Penelitian mengenai representasi fonemik (Cummings *et al.*, 2021; Riedinger *et al.*, 2021) menemukan adanya asimetris MMN di mana beberapa suara ucap menimbulkan MMN sementara suara lain tidak.

Penelitian dengan stimulus visual (vMMN) juga semakin marak dilakukan. Beberapa di antaranya: pemrosesan otomatis terhadap gambar makanan dalam kondisi lapar (Sultson *et al.*, 2019), kategorisasi stimulus visual (Beck *et al.*, 2021) termasuk pada stimulus berupa wajah dari ras yang berbeda (Zeng *et al.*, 2022), deteksi emosi berdasarkan postur tubuh (Ding *et al.*, 2022), pemrosesan kognitif terhadap komposisi gambar pada karya seni abstrak (Menzel *et al.*, 2018), familiaritas terhadap stimulus visual (Sulykos *et al.*, 2015), pengaruh nikotin terhadap efisiensi kognitif (Fisher *et al.*, 2010). Perlu diperhatikan pula, bahwa dalam penelitian vMMN, target stimulus visual diberikan secara *goal-irrelevant* yang artinya subjek diberi tugas lain untuk mendistraksi dari stimulus target.

Penutup

MMN merupakan penanda dari proses otak yang otomatis dan berhubungan dengan sistem yang membantu organisme untuk dapat beradaptasi dan bertahan hidup secara efisien di tengah bombardir informasi dari sensori. Sistem pendeteksi perubahan otomatis ini membantu individu untuk tetap terjaga dengan secara tidak langsung memfilter informasi dengan cara membuat model prediktif tentang kondisi lingkungan. Paradigma eksperimen MMN dapat digunakan untuk secara tidak langsung mengakses proses otak terkait sensori memori, akurasi diskriminasi, kemampuan perseptual, dan pada beberapa kasus ekspektasi jangka panjang. Karena sifatnya yang otomatis dan tidak membutuhkan atensi, MMN merupakan metode yang sangat bermanfaat

untuk menyelidiki mekanisme pemrosesan pada populasi yang memiliki kesulitan untuk mengikuti prosedur eksperimen, misalnya pada anak-anak, atau pasien klinis.

Saran

Penggunaan metode ini masih dapat dieksplorasi lagi. MMN telah digunakan di berbagai bidang penelitian dan dapat digunakan sebagai penanda objektif fisiologis mengenai konstruk-konstruk psikologi. Selain itu potensi penelitiannya juga semakin luas, contohnya melakukan replikasi temuan sebelumnya namun pada populasi Indonesia, meneliti konstruk yang unik di Indonesia (contohnya bahasa, musik, sosial/budaya), hingga mengeksplorasi vMMN yang semakin marak diteliti. Penulis berpendapat bahwa terdapat potensi yang perlu dimulai dengan adanya kerja sama interdisipliner antara peneliti psikologi dengan ahli di bidang-bidang terkait (misalnya ilmu komputer, teknik, elektro, kedokteran, linguistik, hingga musik). Tentunya juga didukung dengan peralatan yang memadai. Dalam hal ini peneliti psikologi dapat memberikan arahan teoritis dan kerangka eksperimen yang berdasarkan pada paradigma dan teori kognitif dan/atau keperilakuan.

Pernyataan

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kelompok riset Brain Imaging Centre, TTK Research Centre for Natural Sciences yang telah menyediakan fasilitas dan lab EEG.

Pendanaan

Penulis tidak menerima bantuan pendanaan dalam penulisan artikel ini.

Kontribusi Penulis

Artikel ini merupakan adaptasi dari bahan tambahan untuk karya tesis yang disusun oleh ZK dan disupervisi dan review oleh FH.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dalam penulisan artikel ini.

Orcid ID

Zulfikri Khakim  <https://orcid.org/0000-0003-0676-7993>

Ferenc Honbolygó  <https://orcid.org/0000-0002-5266-0188>

Daftar Pustaka

- Akatsuka, K., Wasaka, T., Nakata, H., Inui, K., Hoshiyama, M., & Kakigi, R. (2005). Mismatch responses related to temporal discrimination of somatosensory stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 116(8), 1930–1937. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.04.021>
- Aleksandrov, A. A., Memetova, K. S., Stankevich, L. N., Knyazeva, V. M., & Shtyrov, Y. (2019). Referent's lexical frequency predicts mismatch negativity responses to new words following semantic training. *Journal of Psycholinguistic Research*, 49(2), 187–198. <https://doi.org/10.1007/s10936-019-09678-3>
- Alho, K., Sainio, K., Sajaniemi, N., Reinikainen, K., & Näätänen, R. (1990). Event-related brain potential of human newborns to pitch change of an acoustic stimulus. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 77(2), 151–155. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(90\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0168-5597(90)90031-8)
- Alho, K., Woods, D. L., Algazi, A., & Näätänen, R. (1992). Intermodal selective attention (II). Effects of attentional load on processing of auditory and visual stimuli in central space. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82(5), 356–368. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(92\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0013-4694(92)90005-3)
- Alvarez, P. P., Cadaveira, F., & Amenedo, E. (2003). MMN in the visual modality: A review. *Biological Psychology*, 63(3), 199–236. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(03\)00049-8](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(03)00049-8)
- Arndt, C., Schlemmer, K., & van der Meer, E. (2019). Same or different pitch? Effects of musical expertise, pitch difference, and auditory task on the pitch discrimination ability of musicians and non-musicians. *Experimental Brain Research*, 238(1), 247–258. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05707-8>
- Baldeweg, T., Richardson, A., Watkins, S., Foale, C., & Gruzeliier, J. (1999). Impaired auditory frequency discrimination in dyslexia detected with mismatch evoked potentials. *Annals of Neurology*, 45(4), 495–503. [https://doi.org/10.1002/1531-8249\(199904\)45:4<495::aid-ana11>3.0.co;2-m](https://doi.org/10.1002/1531-8249(199904)45:4<495::aid-ana11>3.0.co;2-m)
- Beck, A.-K., Berti, S., Czernochowski, D., & Lachmann, T. (2021). Do categorical representations modulate early automatic visual processing? A visual mismatch-negativity study. *Biological Psychology*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2021.108139>
- Bhat, A., Irizar, H., Thygesen, J. H., Kuchenbaecker, K., Pain, O., Adams, R. A., Zartalous, E., Harju-Seppänen, J., Austin-Zimmerman, I., Wang, B., Muir, R., Summerfelt, A., Du, X. M., Bruce, H., O'Donnell, P., Srivastava, D. P., Friston, K., Hong, L. E., Hall, M.-H., & Bramon, E. (2021). Transcriptome-wide association study reveals two genes that influence mismatch negativity. *Cell Reports*, 34(11), 108868. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2021.108868>
- Bissonnette, J. N., Francis, A. M., Hull, K. M., Leckey, J., Pimer, L., Berrigan, L. I., & Fisher, D. J. (2020). MMN-Indexed auditory change detection in major depressive disorder. *Clinical EEG and Neuroscience*, 51(6), 365–372. <https://doi.org/10.1177/1550059420914200>

- Bojorque, P. C., Monte-Ordone, J., & Toro, J. M. (2018). Early neural responses underlie advantages for consonance over dissonance. *Neuropsychologia*, *117*, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.06.005>
- Bonetti, L., Haumann, N., Vuust, P., Kliuchko, M., & Brattico, E. (2017). Risk of depression enhances auditory pitch discrimination in the brain as indexed by the mismatch negativity. *Clinical Neurophysiology*, *128*(10), 1923–1936. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.07.004>
- Bötzel, K., Schulze, S., & Stodieck, S. (1995). Scalp topography and analysis of intracranial sources of face-evoked potentials. *Experimental Brain Research*, *104*(1). <https://doi.org/10.1007/bf00229863>
- Brunelière, A., Dufour, S., & Nguyen, N. (2011). Regional differences in the listener's phonemic inventory affect semantic processing: A mismatch negativity (MMN) study. *Brain and Language*, *117*(1), 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2010.12.004>
- Casado, A., & Brunelière, A. (2016). The influence of sex information into spoken words: A mismatch negativity (MMN) study. *Brain Research*, *1650*, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2016.08.039>
- Chen, C., Chan, C.-W., & Cheng, Y. (2018). Test-retest reliability of mismatch negativity (MMN) to emotional voices. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00453>
- Chen, T. C., Hsieh, M. H., Lin, Y.-T., Chan, P.-Y. S., & Cheng, C.-H. (2020). Mismatch negativity to different deviant changes in autism spectrum disorders: A meta-analysis. *Clinical Neurophysiology*, *131*(3), 766–777. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.10.031>
- Cohen, D. (1972). Magnetoencephalography: Detection of the brain's electrical activity with a superconducting magnetometer. *Science*, *175*(4022), 664–666. <https://doi.org/10.1126/science.175.4022.664>
- Csépe, V., Karmos, G., & Molnár, M. (1987). Evoked potential correlates of stimulus deviance during wakefulness and sleep in cat — animal model of mismatch negativity. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *66*(6), 571–578. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(87\)90103-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(87)90103-9)
- Cummings, A. E., Wu, Y. C., & Ogiela, D. A. (2021). Phonological underspecification: An explanation for how a rake can become awake. *Frontiers in Human Neuroscience*, *15*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.585817>
- Deng, N., Sun, Y., Chen, X., & Li, W. (2021). How does self name influence the neural processing of emotional prosody? an erp study. *PsyCh Journal*, *11*(1), 30–42. <https://doi.org/10.1002/pchj.499>
- Ding, X., Chen, Y., Liu, Y., Zhao, J., & Liu, J. (2022). The automatic detection of unexpected emotion and neutral body postures: A visual mismatch negativity study. *Neuropsychologia*, *164*, 108108. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108108>
- Doering, L. B., Deuster, D., Giordano, V., am Zehnhoff Dinnesen, A., & Dobel, C. (2015). A systematic review of the mismatch negativity as an index for auditory sensory memory: From basic

- research to clinical and developmental perspectives. *Psychophysiology*, 52(9), 1115–1130. <https://doi.org/10.1111/psyp.12459>
- Donaldson, K. R., Larsen, E. M., Jonas, K., Tramazzo, S., Perlman, G., Foti, D., Mohanty, A., & Kotov, R. (2021). Mismatch negativity amplitude in first-degree relatives of individuals with psychotic disorders: Links with cognition and schizotypy. *Schizophrenia Research*, 238, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2021.10.006>
- Eimer, M. (2011). The face-sensitivity of the n170 component. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00119>
- Engstrom, E., Kallioinen, P., von Mentzer, C. N., Lindgren, M., Sahl'en, B., Lyxell, B., Ors, M., & Uhl'en, I. (2021). Auditory event-related potentials and mismatch negativity in children with hearing loss using hearing aids or cochlear implants - A three-year follow-up study. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 140, 110519. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2020.110519>
- Fan, L., Sun, Y.-B., Sun, Z.-K., Wang, N., Luo, F., Yu, F., & Wang, J.-Y. (2018). Modulation of auditory sensory memory by chronic clinical pain and acute experimental pain: A mismatch negativity study. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34099-y>
- Fernandes, N. M., Gil, D., & de Azevedo, M. F. (2019). Mismatch negativity in children with cochlear implant. *International Archives of Otorhinolaryngology*, 23(03), e292–e298. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1688967>
- Fischer, C., Luauté, J., Némóz, C., Morlet, D., Kirkorian, G., & Mauguière, F. (2006). Improved prediction of awakening or nonawakening from severe anoxic coma using tree-based classification analysis*. *Critical Care Medicine*, 34(5), 1520–1524. <https://doi.org/10.1097/01.ccm.0000215823.36344.99>
- Fisher, D. J., Scott, T. L., Shah, D. K., Prise, S., Thompson, M., & Knott, V. J. (2010). Light up and see: Enhancement of the visual mismatch negativity (vMMN) by nicotine. *Brain Research*, 1313, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.12.002>
- Fishman, Y. I., Volkov, I. O., Noh, M. D., Garell, P. C., Bakken, H., Arezzo, J. C., Howard, M. A., & Steinschneider, M. (2001). Consonance and dissonance of musical chords: Neural correlates in auditory cortex of monkeys and humans. *Journal of Neurophysiology*, 86(6), 2761–2788. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.86.6.2761>
- Fitzgerald, K., & Todd, J. (2020). Making sense of mismatch negativity. *Frontiers in Psychiatry*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2020.00468>
- Franken, I. H., Nijs, I., & Strien, J. W. V. (2005). Impulsivity affects mismatch negativity (MMN) measures of preattentive auditory processing. *Biological Psychology*, 70(3), 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.01.007>
- Friston, K. (2003). Learning and inference in the brain. *Neural Networks*, 16(9), 1325–1352. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2003.06.005>
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815–836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>

- Fucci, E., Abdoun, O., Caclin, A., Francis, A., Dunne, J., Ricard, M., Davidson, R., & Lutz, A. (2018). Differential effects of non-dual and focused attention meditations on the formation of automatic perceptual habits in expert practitioners. *Neuropsychologia*, *119*, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.07.025>
- Fucci, E., Pouban-Couzardot, A., Abdoun, O., & Lutz, A. (2022). No effect of focused attention and open monitoring meditation on EEG auditory mismatch negativity in expert and novice practitioners. *International Journal of Psychophysiology*, *176*, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2022.03.010>
- Gandor, C. B., & Ullsperger, P. (1992). Mismatch negativity in event-related potentials to auditory stimuli as a function of varying interstimulus interval. *Psychophysiology*, *29*(5), 546–550. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1992.tb02028.x>
- Garami, L., Ragó, A., Honbolygó, F., & Csépe, V. (2017). Lexical influence on stress processing in a fixed-stress language. *International Journal of Psychophysiology*, *117*, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.03.006>
- Garrido, M. I., Kilner, J. M., Stephan, K. E., & Friston, K. J. (2009). The mismatch negativity: A review of underlying mechanisms. *Clinical Neurophysiology*, *120*(3), 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.11.029>
- Giard, M.-H., Perrin, F., Pernier, J., & Bouchet, P. (1990). Brain generators implicated in the processing of auditory stimulus deviance: A topographic event-related potential study. *Psychophysiology*, *27*(6), 627–640. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1990.tb03184.x>
- Greber, M., Rogenmoser, L., Elmer, S., & Jäncke, L. (2018). Electrophysiological correlates of absolute pitch in a passive auditory oddball paradigm: A direct replication attempt. *eneuro*, *5*(6), ENEURO.0333–18.2018. <https://doi.org/10.1523/eneuro.0333-18.2018>
- Green, H. L., Shuffrey, L. C., Levinson, L., Shen, G., Avery, T., Wagner, M. R., Sepulveda, D. M., Garcia, P., Maddox, C., Garcia, F., Hassan, S., & Froud, K. (2020). Evaluation of mismatch negativity as a marker for language impairment in autism spectrum disorder. *Journal of Communication Disorders*, *87*, 105997. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2020.105997>
- Groppe, D. M., Urbach, T. P., & Kutas, M. (2011). Mass univariate analysis of event-related brain potentials/fields I: A critical tutorial review. *Psychophysiology*, *48*(12), 1711–1725. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01273.x>
- Gu, C., & Bi, H.-Y. (2020). Auditory processing deficit in individuals with dyslexia: A meta-analysis of mismatch negativity. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *116*, 396–405. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.06.032>
- Hanna, J., Cappelle, B., & Pulvermüller, F. (2017). Spread the word: MMN brain response reveals whole-form access of discontinuous particle verbs. *Brain and Language*, *175*, 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.10.002>
- He, X., Liu, W., Qin, N., Lyu, L., Dong, X., & Bao, M. (2021). Performance-dependent reward hurts performance: The non-monotonic attentional load modulation on task-irrelevant distractor processing. *Psychophysiology*, *58*(12). <https://doi.org/10.1111/psyp.13920>

- He, X., Zhang, J., Zhang, Z., Go, R., Wu, J., Li, C., Gan, K., & Chen, D. (2020). Effects of visual attentional load on the tactile sensory memory indexed by somatosensory mismatch negativity. *Frontiers in Neuroinformatics*, 14. <https://doi.org/10.3389/fninf.2020.575078>
- Higgins, A., Lewandowski, K. E., Liukasemsarn, S., & Hall, M.-H. (2021). Longitudinal relationships between mismatch negativity, cognitive performance, and real-world functioning in early psychosis. *Schizophrenia Research*, 228, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2021.01.009>
- Hjorth, B. (1970). EEG analysis based on time domain properties. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 29(3), 306–310. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(70\)90143-4](https://doi.org/10.1016/0013-4694(70)90143-4)
- Honbolygó, F., Kóbor, A., German, B., & Csépe, V. (2020). Word stress representations are language-specific: Evidence from event-related brain potentials. *Psychophysiology*, 57(5). <https://doi.org/10.1111/psyp.13541>
- Honbolygó, F., Kolozsvári, O., & Csépe, V. (2017). Processing of word stress related acoustic information : A multi-feature MMN study. *International Journal of Psychophysiology*, 118(0), 9–17. <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/54259%20https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016787601730315X>
- Houlihan, M., & Stelmack, R. M. (2012). Mental ability and mismatch negativity: Pre-attentive discrimination of abstract feature conjunctions in auditory sequences. *Intelligence*, 40(3), 239–244. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2012.02.003>
- Jaaskelainen, I. P., Ahveninen, J., Bonmassar, G., Dale, A. M., Ilmoniemi, R. J., Levanen, S., Lin, F.-H., May, P., Melcher, J., Stufflebeam, S., Tiitinen, H., & Belliveau, J. W. (2004). Human posterior auditory cortex gates novel sounds to consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(17), 6809–6814. <https://doi.org/10.1073/pnas.0303760101>
- Jaaskelainen, I. P., Hautamaki, M., Näätänen, R., & Ilmoniemi, R. J. (1999). Temporal span of human echoic memory and mismatch negativity: Revisited. *NeuroReport*, 10(6). https://journals.lww.com/neuroreport/Fulltext/1999/04260/Temporal%5C_span%5C_of%5C_human%5C_echoic%5C_memor_and%5C_mismatch.28.aspx%7D
- Jarkiewicz, M., & Wichniak, A. (2015). Can new paradigms bring new perspectives for mismatch negativity studies in schizophrenia? *Neuropsychiatric Electrophysiology*, 1(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/S40810-015-0010-Z/TABLES/1>
- Kappenman, E. S., Farrens, J. L., Zhang, W., Stewart, A. X., & Luck, S. J. (2021). ERP CORE: An open resource for human event-related potential research. *NeuroImage*, 225, 117465. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117465>
- Kekoni, J., Hamalainen, H., Saarinen, M., Grohn, J., Reinikainen, K., Lehtokoski, A., & Näätänen, R. (1997). Rate effect and mismatch responses in the somatosensory system: ERP-recordings in humans. *Biological Psychology*, 46(2), 125–142. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(97\)05249-6](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(97)05249-6)
- Khakim, Z., & Kusrohmaniah, S. (2021). Dasar-dasar electroencephalography (EEG) bagi riset psikologi [Electroencephalography (EEG) fundamentals for psychological research]. *Buletin Psikologi*, 29(1), 92. <https://doi.org/10.22146/buletinpsikologi.52328>

- Kim, S., Baek, J. H., Shim, S.-h., Kwon, Y. J., Lee, H. Y., Yoo, J. H., & Kim, J. S. (2020). Mismatch negativity indices and functional outcomes in unipolar and bipolar depression. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69776-4>
- Kirihara, K., Tada, M., Koshiyama, D., Fujioka, M., Usui, K., Araki, T., & Kasai, K. (2020). A Predictive coding perspective on mismatch negativity impairment in schizophrenia. *Frontiers in Psychiatry*, *11*, 660. <https://doi.org/10.3389/FPSYT.2020.00660/BIBTEX>
- Kliuchko, M., Brattico, E., Gold, B. P., Tervaniemi, M., Bogert, B., Toiviainen, P., & Vuust, P. (2019). Fractionating auditory priors: A neural dissociation between active and passive experience of musical sounds. *PLOS ONE*, *14*(5), e0216499. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216499>
- Kliuchko, M., Heinonen-Guzejev, M., Vuust, P., Tervaniemi, M., & Brattico, E. (2016). A window into the brain mechanisms associated with noise sensitivity. *Scientific Reports*, *6*(1). <https://doi.org/10.1038/srep39236>
- Korne, G. S., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1998). Auditory processing and dyslexia. *NeuroReport*, *9*(2), 337–340. <https://doi.org/10.1097/00001756-199801260-00029>
- Koshiyama, D., Kirihara, K., Tada, M., Nagai, T., Fujioka, M., Usui, K., Araki, T., & Kasai, K. (2020). Reduced auditory mismatch negativity reflects impaired deviance detection in schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, *46*(4), 937–946. <https://doi.org/10.1093/schbul/sbaa006>
- Kostilainen, K., Wikström, V., Pakarinen, S., Videman, M., Karlsson, L., Keskinen, M., Scheinin, N. M., Karlsson, H., & Huotilainen, M. (2018). Healthy full-term infants' brain responses to emotionally and linguistically relevant sounds using a multi-feature mismatch negativity (MMN) paradigm. *Neuroscience Letters*, *670*, 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.01.039>
- Kotzor, S., Wetterlin, A., & Lahiri, A. (2017). Symmetry or asymmetry: Evidence for underspecification in the mental lexicon. *The Speech Processing Lexicon*, 85–106. <https://doi.org/10.1515/9783110422658-005/HTML>
- Kremláček, J., Kuba, M., Kubová, Z., & Langrová, J. (2006). Visual mismatch negativity elicited by magnocellular system activation. *Vision Research*, *46*(4), 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.10.001>
- Kremláček, J., Kreegipuu, K., Tales, A., Astikainen, P., Pöldver, N., Näätänen, R., & Stefanics, G. (2016). Visual mismatch negativity (vMMN): A review and meta-analysis of studies in psychiatric and neurological disorders. *Cortex*, *80*, 76–112. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.03.017>
- Kujala, T., Kuuluvainen, S., Saalasti, S., Jansson-Verkasalo, E., von Wendt, L., & Lepistö, T. (2010). Speech-feature discrimination in children with Asperger syndrome as determined with the multi-feature mismatch negativity paradigm. *Clinical Neurophysiology*, *121*(9), 1410–1419. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.03.017>
- Kujala, T., Tervaniemi, M., & Schröger, E. (2007). The mismatch negativity in cognitive and clinical neuroscience: Theoretical and methodological considerations. *Biological Psychology*, *74*(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2006.06.001>

- Kuuluvainen, S., Alku, P., Makkonen, T., Lipsanen, J., & Kujala, T. (2016). Cortical speech and non-speech discrimination in relation to cognitive measures in preschool children (S. Molholm, Ed.). *European Journal of Neuroscience*, 43(6), 738–750. <https://doi.org/10.1111/ejn.13141>
- Lappe, C., Lappe, M., & Pantev, C. (2016). Differential processing of melodic, rhythmic and simple tone deviations in musicians -an (MEG) study. *NeuroImage*, 124, 898–905. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.09.059>
- Lindström, R., Lepistö-Paisley, T., Makkonen, T., Reinvall, O., Nieminen-von Wendt, T., Alén, R., & Kujala, T. (2018). Atypical perceptual and neural processing of emotional prosodic changes in children with autism spectrum disorders. *Clinical Neurophysiology*, 129(11), 2411–2420. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.08.018>
- Luck, S. J. (2012). Event-related potentials. In *Apa handbook of research methods in psychology, vol 1: Foundations, planning, measures, and psychometrics*. (pp. 523–546). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/13619-028>
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT Press.
- Luck, S. J., & Kappenman, E. (2011). *Oxford handbook of ERP*.
- Luck, S. J., Kappenman, E. S., Fuller, R. L., Robinson, B., Summerfelt, A., & Gold, J. M. (2009). Impaired response selection in schizophrenia: Evidence from the p3 wave and the lateralized readiness potential. *Psychophysiology*, 46(4), 776–786. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00817.x>
- Marhl, U., Jodko-Władzińska, A., Brühl, R., Sander, T., & Jazbinšek, V. (2022). Transforming and comparing data between standard SQUID and OPM-MEG systems (C. Papadelis, Ed.). *Plos One*, 17(1), e0262669. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262669>
- Mathias, B., Lidji, P., Honing, H., Palmer, C., & Peretz, I. (2016). Electrical brain responses to beat irregularities in two cases of beat deafness. *Frontiers in Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00040>
- McDermott, J. H., Schultz, A. F., Undurraga, E. A., & Godoy, R. A. (2016). Indifference to dissonance in native amazonians reveals cultural variation in music perception. *Nature*, 535(7613), 547–550. <https://doi.org/10.1038/nature18635>
- Menzel, C., Kovács, G., Amado, C., Hayn-Leichsenring, G. U., & Redies, C. (2018). Visual mismatch negativity indicates automatic, task-independent detection of artistic image composition in abstract artworks. *Biological Psychology*, 136, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.05.005>
- Näätänen, R., & Kreegipuu, K. (2011). *The mismatch negativity (MMN)*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0081>
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology*, 118(12), 2544–2590. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.026>
- Näätänen, R. (2003). Mismatch negativity: Clinical research and possible applications. *International Journal of Psychophysiology*, 48(2), 179–188. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(03\)00053-9](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(03)00053-9)

- Näätänen, R., & Gaillard, A. (1983). 5 the orienting reflex and the n2 deflection of the event-related potential (ERP). In *Advances in psychology* (pp. 119–141). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/s0166-4115\(08\)62036-1](https://doi.org/10.1016/s0166-4115(08)62036-1)
- Näätänen, R., Gaillard, A., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42(4), 313–329. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(78\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(78)90006-9)
- Näätänen, R., Jacobsen, T., & Winkler, I. (2005). Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): A review of the evidence. *Psychophysiology*, 42(1), 25–32. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00256.x>
- Näätänen, R., Pakarinen, S., Rinne, T., & Takegata, R. (2004). The mismatch negativity (MMN): Towards the optimal paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 115(1), 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2003.04.001>
- Näätänen, R., Petersen, B., Torppa, R., Lonka, E., & Vuust, P. (2017). The mmn as a viable and objective marker of auditory development in ci users. *Hearing Research*, 353, 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2017.07.007>
- Näätänen, R., Shiga, T., Asano, S., & Yabe, H. (2015). Mismatch negativity mmn deficiency: A break-through biomarker in predicting psychosis onset. *International Journal of Psychophysiology*, 95(3), 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.12.012>
- Nan, Y., Huang, W.-t., Wang, W.-j., Liu, C., & Dong, Q. (2016). Subgroup differences in the lexical tone mismatch negativity (MMN) among Mandarin speakers with congenital amusia. *Biological Psychology*, 113, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.11.010>
- Pakarinen, S., Lohilahti, J., Sokka, L., Korpela, J., Huutilainen, M., & Müller, K. (2021). Auditory deviance detection and involuntary attention allocation in occupational burnout—a follow-up study. *European Journal of Neuroscience*, 55(9-10), 2592–2611. <https://doi.org/10.1111/ejn.15429>
- Petrosino, R., Almeida, D., Calabrese, A., & Sprouse, J. (2021). *Social cognition categories impact early auditory processing: Asymmetrical mismatch negativities to socially-marked biological sounds* (tech. rep.). <https://robpetrosino.github.io/publication/mmns/>
- Plumridge, J. M. A., Barham, M. P., Foley, D. L., Ware, A. T., Clark, G. M., Albein-Urios, N., Hayden, M. J., & Lum, J. A. G. (2020). The effect of visual articulatory information on the neural correlates of non-native speech sound discrimination. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00025>
- Pulvermüller, F., & Shtyrov, Y. (2003). Automatic processing of grammar in the human brain as revealed by the mismatch negativity. *NeuroImage*, 20(1), 159–172. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(03\)00261-1](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(03)00261-1)
- Pulvermüller, F., Shtyrov, Y., Hasting, A. S., & Carlyon, R. P. (2008). Syntax as a reflex: Neurophysiological evidence for early automaticity of grammatical processing. *Brain and Language*, 104(3), 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2007.05.002>
- Putkinen, V., Makkonen, T., & Eerola, T. (2017). Music-induced positive mood broadens the scope of auditory attention. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(7), 1159–1168. <https://doi.org/10.1093/scan/nsx038>

- Putkinen, V., Tervaniemi, M., & Huotilainen, M. (2019). Musical playschool activities are linked to faster auditory development during preschool-age: A longitudinal ERP study. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47467-z>
- Quiroga-Martinez, D. R., Hansen, N. C., Højlund, A., Pearce, M., Brattico, E., & Vuust, P. (2020). Musical prediction error responses similarly reduced by predictive uncertainty in musicians and non-musicians. *European Journal of Neuroscience*, 51(11), 2250–2269. <https://doi.org/10.1111/ejn.14667>
- Rachman, L., Dubal, S., & Aucouturier, J.-J. (2019). Happy you, happy me: Expressive changes on a stranger's voice recruit faster implicit processes than self-produced expressions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 14(5), 559–568. <https://doi.org/10.1093/scan/nsz030>
- Riedinger, M., Nagels, A., Werth, A., & Scharinger, M. (2021). Asymmetries in accessing vowel representations are driven by phonological and acoustic properties: Neural and behavioral evidence from natural german minimal pairs. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.612345>
- Saarikivi, K., Putkinen, V., Tervaniemi, M., & Huotilainen, M. (2016). Cognitive flexibility modulates maturation and music-training-related changes in neural sound discrimination (S. Molholm, Ed.). *European Journal of Neuroscience*, 44(2), 1815–1825. <https://doi.org/10.1111/ejn.13176>
- Sabri, M., & Campbell, K. B. (2001). Effects of sequential and temporal probability of deviant occurrence on mismatch negativity. *Cognitive Brain Research*, 12(1), 171–180. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(01\)00026-x](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(01)00026-x)
- Sams, M., Hämäläinen, M., Antervo, A., Kaukoranta, E., Reinikainen, K., & Hari, R. (1985). Cerebral neuromagnetic responses evoked by short auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 61(4), 254–266. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(85\)91092-2](https://doi.org/10.1016/0013-4694(85)91092-2)
- Sams, M., Hari, R., Rif, J., & Knuutila, J. (1993). The human auditory sensory memory trace persists about 10 sec: Neuromagnetic evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5(3), 363–370. <https://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.3.363>
- Sato, Y., Yabe, H., Hiruma, T., Sutoh, T., Shinozaki, N., Nashida, T., & Kaneko, S. (2000). The effect of deviant stimulus probability on the human mismatch process. *NeuroReport*, 11(17), 3703–3708. <https://doi.org/10.1097/00001756-200011270-00023>
- Schwartz, S., Shinn-Cunningham, B., & Tager-Flusberg, H. (2018). Meta-analysis and systematic review of the literature characterizing auditory mismatch negativity in individuals with autism. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 87, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.01.008>
- Sethares, W. A. (2005). The gamelan. In *Tuning, timbre, spectrum, scale* (pp. 199–220). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/1-84628-113-x_10
- Shen, G., Meltzoff, A. N., Weiss, S. M., & Marshall, P. J. (2020). Body representation in infants: Categorical boundaries of body parts as assessed by somatosensory mismatch negativity. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 44, 100795. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2020.100795>

- Shen, G., Weiss, S. M., Meltzoff, A. N., & Marshall, P. J. (2018). The somatosensory mismatch negativity as a window into body representations in infancy. *International Journal of Psychophysiology*, *134*, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.10.013>
- Singh, S. (2014). Magnetoencephalography: Basic principles. *Annals of Indian Academy of Neurology*, *17*(5), 107. <https://doi.org/10.4103/0972-2327.128676>
- Spackman, L., Towell, A., & Boyd, S. (2010). Somatosensory discrimination: An intracranial event-related potential study of children with refractory epilepsy. *Brain Research*, *1310*, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.10.072>
- Squires, N. K., Squires, K. C., & Hillyard, S. A. (1975). Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *38*(4), 387–401. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(75\)90263-1](https://doi.org/10.1016/0013-4694(75)90263-1)
- Stefanics, G., Kremláček, J., & Czigler, I. (2014). Visual mismatch negativity: A predictive coding view. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00666>
- Strömmer, J. M., Tarkka, I. M., & Astikainen, P. (2014). Somatosensory mismatch response in young and elderly adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00293>
- Sultson, H., Vainik, U., & Kreegipuu, K. (2019). Hunger enhances automatic processing of food and non-food stimuli: A visual mismatch negativity study. *Appetite*, *133*, 324–336. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2018.11.031>
- Sulykos, I., Kecskés-Kovács, K., & Czigler, I. (2015). Asymmetric effect of automatic deviant detection: The effect of familiarity in visual mismatch negativity. *Brain Research*, *1626*, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.02.035>
- Sussman, E., Winkler, I., & Wang, W. (2003). MMN and attention: Competition for deviance detection. *Psychophysiology*, *40*(3), 430–435. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00045>
- Teemu, R., Kimmo, A., Ilmoniemi, R., Virtanen, J., & Näätänen, R. (2000). Separate time behaviors of the temporal and frontal mismatch negativity sources. *NeuroImage*, *12*(1), 14–19. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0591>
- Tervaniemi, M., Janhunen, L., Kruck, S., Putkinen, V., & Huotilainen, M. (2016). Auditory profiles of classical, jazz, and rock musicians: Genre-specific sensitivity to musical sound features. *Frontiers in Psychology*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01900>
- Thornton, D., Harkrider, A. W., Jenson, D. E., & Saltuklaroglu, T. (2019). Sex differences in early sensorimotor processing for speech discrimination. *Scientific Reports*, *9*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36775-5>
- Tiitinen, H., May, P., Reinikainen, K., & Näätänen, R. (1994). Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature*, *372*(6501), 90–92. <https://doi.org/10.1038/372090a0>
- Vuust, P., Brattico, E., Glerean, E., Seppänen, M., Pakarinen, S., Tervaniemi, M., & Näätänen, R. (2011). New fast mismatch negativity paradigm for determining the neural prerequisites for musical ability. *Cortex*, *47*(9), 1091–1098. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.04.026>

- Vuust, P., Brattico, E., Seppänen, M., Näätänen, R., & Tervaniemi, M. (2012). The sound of music: Differentiating musicians using a fast, musical multi-feature mismatch negativity paradigm. *Neuropsychologia*, *50*(7), 1432–1443. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.02.028>
- Vuust, P., Heggli, O. A., Friston, K. J., & Kringelbach, M. L. (2022). Music in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *23*(5), 287–305. <https://doi.org/10.1038/s41583-022-00578-5>
- Wagner, L., Rahne, T., Plontke, S. K., & Heidekrüger, N. (2018). Mismatch negativity reflects asymmetric pre-attentive harmonic interval discrimination (M. S. Malmierca, Ed.). *Plos One*, *13*(4), e0196176. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196176>
- Wang, Y., Huang, X., Zhang, J., Huang, S., Wang, J., Feng, Y., Jiang, Z., Wang, H., & Yin, S. (2022). Bottom-up and top-down attention impairment induced by long-term exposure to noise in the absence of threshold shifts. *Frontiers in Neurology*, *13*. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.836683>
- Wanyan, X., Zhuang, D., Lin, Y., Xiao, X., & Song, J.-W. (2018). Influence of mental workload on detecting information varieties revealed by mismatch negativity during flight simulation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *64*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2017.08.004>
- Winkler, I., Reinikainen, K., & Näätänen, R. (1993). Event-related brain potentials reflect traces of echoic memory in humans. *Perception & Psychophysics*, *53*(4), 443–449. <https://doi.org/10.3758/bf03206788>
- Winkler, I., & Schröger, E. (2015). Auditory perceptual objects as generative models: Setting the stage for communication by sound. *Brain and Language*, *148*, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.05.003>
- Yüksel, M., Murphy, M., Rippe, J., Leicht, G., & Öngür, D. (2021). Decreased mismatch negativity and elevated frontal-lateral connectivity in first-episode psychosis. *Journal of Psychiatric Research*, *144*, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2021.09.034>
- Zeng, G. Q., Xiao, X.-Z., Wang, Y., & Tse, C.-Y. (2022). Belief in biological origin of race (racial essentialism) increases sensitivities to cultural category changes measured by (ERP) mismatch negativity (MMN). *Scientific Reports*, *12*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08399-3>
- Zora, H., Rudner, M., & Magnusson, A. K. M. (2020). Concurrent affective and linguistic prosody with the same emotional valence elicits a late positive ERP response. *European Journal of Neuroscience*, *51*(11), 2236–2249. <https://doi.org/10.1111/ejn.14658>